

JAERI-M
89-048

損傷炉心冷却挙動解析プログラムの開発

1989年5月

阿部 豊・丸山 結・三野 義孝^{*}
早田 邦久

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

損傷炉心冷却挙動解析プログラムの開発

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

阿部 豊⁺・丸山 結・三野 義孝^{*}
早田 邦久

(1989年4月4日受理)

TMI-2事故において見られたように、炉心冷却能力の低下により炉心が損傷するような事故が生じた場合、溶融した炉心は冷却材との相互作用により粒子状の堆積物（デブリベッド）を形成する可能性がある。このデブリベッドは残留崩壊熱により発熱しており、万が一冷却が確保されなかった場合、再溶融から圧力容器の貫通を招くことになる。損傷炉心の冷却性を予測することは、事故の推移を評価するとともに事故の拡大を防ぐ上で極めて重要である。

そこで日本原子力研究所では、損傷炉心の冷却性を判定するための基準となる、デブリベッドがドライアウトする条件を予測するため、「損傷炉心冷却挙動解析プログラム」を開発するとともに、国内外の実験データを収集しデータベースとして整備し、整備したデータベースを用いて、本解析プログラムの性能評価を行った。その結果、本解析手法が、損傷炉心の冷却基準を与える手法として十分有効であることを確認した。

本解析プログラムは、データベースと併せて、炉心損傷事故時における事故進展評価解析並びに事故管理に有用な情報の提供を行うものである。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

+ 原子炉工学部

* (株) NDC

Development of Degraded Core Coolability Analysis Program

Yutaka ABE⁺, Yu MARUYAMA, Yoshitaka MINO^{*} and Kunihisa SODA

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken

(Received April 4, 1989)

In case of a severe accident of a light water reactor caused by loss of core cooling capacity, as was observed in the TMI-2 accident, a debris bed consisting of the degraded core materials may be formed as the result of the interaction between the melting core materials and coolant water. Since the debris bed continues to release decay heat, the debris bed would melt again if the debris bed would not be cooled. Therefore, it is quite important to estimate the coolability of the debris bed in order to evaluate accident progression and terminate the accident within the reactor pressure vessel. In this work, the degraded core coolability analysis program to predict dryout heat flux of the debris bed and the database containing the previous experimental results were developed. In addition, the analysis program was verified by comparing the analysis results with the experimentals. It is expected that the analysis program would offer valuable information for the accident progression analysis and the accident management strategies together with database.

Keywords : Degraded core Coolability, Analysis Program, Severe Accident, TMI-2 Accident, Debris bed, Dryout Heat Flux

+ Department of Reactor Engineering

* Nuclear Data Corporation

目 次

1. 緒言	1
2. 解析モデル	2
2.1 ドライアウト現象	2
2.2 基礎方程式	2
2.3 物理モデル	3
2.3.1 加速損失	3
2.3.2 相間摩擦	3
2.3.3 透過率	3
2.3.4 比透過率	4
2.3.5 気液間の圧力差	4
3. 解析手法	7
3.1 計算式	7
3.2 計算方法	8
3.3 ドライアウトの判定方法	8
3.4 物理的諸条件	9
3.4.1 粒径分布	9
3.4.2 境界条件	9
4. 損傷炉心冷却挙動実験解析	15
4.1 物理モデルについての考察	15
4.1.1 加速損失の効果	15
4.1.2 相間摩擦の効果	15
4.1.3 乱流の比透過率の効果	15
4.1.4 気液間の圧力差の効果	16
4.1.5 まとめ	16
4.2 物理的諸条件の検討	16
4.2.1 粒子径の効果	16
4.2.2 粒径分布の効果	17
4.2.3 ベッド高の効果	17
4.2.4 流量の効果	18
4.2.5 圧力の効果	18
4.2.6 上部押えの効果	18
4.2.7 サブクールの効果	18

5. 結言	33
謝辞	34
参考文献	34
付録A 炉心の損傷形態と損傷炉心の冷却性.....	36
付録B プログラムの使用方法	42

Contents

1. Introduction	1
2. Analytical Model	2
2.1 Dryout Phenomena	2
2.2 Basic Equation	2
2.3 Physical Model	3
2.3.1 Acceleration Loss	3
2.3.2 Gas-Liquid Interfacial friction	3
2.3.3 Permeability	3
2.3.4 Relative Permeability	4
2.3.5 Pressure Difference between Gas and Liquid	4
3. Analysis Method	7
3.1 Calculation Method	7
3.2 Calculation Equation	8
3.3 Determination Method of Dryout Heat Flux	8
3.4 Physical Conditions	9
3.4.1 Particle Size Distribution	9
3.4.2 Boundary Conditions	9
4. Analysis of Degraded Core Coolability	15
4.1 Discussion on Physical Models	15
4.1.1 Acceleration Loss	15
4.1.2 Gas-liquid Interface friction	15
4.1.3 Relative Permeability for Turbulent Flow	15
4.1.4 Pressure Difference between Gas and Liquid	16
4.1.5 Summary	16
4.2 Discussion on the Effect of Physical Conditions	16
4.2.1 Particle Size	16
4.2.2 Particle Size Distribution	17
4.2.3 Bed Height	17
4.2.4 Coolant Mass Flow Rate	18
4.2.5 System Pressure	18
4.2.6 Bed Top Condition	18
4.2.7 Coolant Subcooling	18

5. Conclusions	33
Acknowledgement	34
References	34
Appendix A Types of Core Degradation and Degraded Core Coolability ...	36
Appendix B User's Manual	42

記号

A	デブリベッド断面積 (m ²)
d	粒子径 (m)
F	相関摩擦力 (kg/s ² ・m ²)
g	重力加速度 (m/s ²)
G	Leverett関数
h	層状に分布した粒子層の各高さ (m)
h _{fg}	蒸発潜熱 (w/kg)
H	デブリベッド高さ (m)
K	層流透過率 (m ²)
P	圧力 (Pa)
P _c	気液間の圧力差 (Pa)
q	熱流束 (w/m ²)
Q	発熱密度 (w/m ³)
s	水率
T	温度 (°C)
V	冷却材流速 (m/s)
w	冷却材質量流速 (kg/m ² ・ s)
W	(8)式で定義される関数
z	垂直方向高さ (m)

添字

DR	ドライアウト
g	気相
l	液相
p	粒子
sub	サブクール
o	デブリベッド下部

ギリシャ文字

α	ボイド率
ϵ	空孔率
η	乱流透過率 (m)
θ	接触角
μ	粘性係数 (Pa)
ρ	密度 (kg/m ³)
σ	表面張力 (N/m)
σ_d	粒子径分布の標準偏差

1. 緒 言

TMI-2 事故において見られたように、炉心冷却能力の低下により炉心が損傷するような事故が生じた場合、溶融した炉心は冷却材との相互作用により粒子状の堆積物（デブリベッド）を形成する可能性がある。このデブリベッドは残留崩壊熱により発熱しており、万が一冷却が確保されなかつた場合、再溶融から圧力容器の貫通に至る可能性がある。損傷炉心の冷却性を予測することは、事故の推移を評価するとともに事故の拡大を防ぐ上で極めて重要である。

デブリベッド中のドライアウト熱流束を求めるための解析手法については、多くの研究者によって数多くの解析手法が提案されているが、運動方程式の取り扱いの違いにより大きく二つの手法に分けられる。一つは、多孔質中のフラッディング相間式を用いるもので、もう一つは運動量保存則を用いるものである。フラッディング相間式を用いる手法については既に報告しているが⁽¹⁾、極めて簡単にドライアウト熱流束を見積ることができる一方、流量やベッド径・ベッド高等の効果を考慮することができない欠点がある。一方、運動量保存則を用いた解析モデルには、(1)液相に関する層流抵抗のみを考慮したもの⁽²⁾、(2)気相・液相に関して層流抵抗を考慮したもの⁽³⁾、(3)気相・液相に関する層抵抗を考慮するとともに、気液間の圧力差を考慮したもの⁽⁴⁾、(4)気相・液相に関する層流抵抗と気液間の圧力差に気相・液相に関する乱流抵抗を考慮したもの⁽⁵⁾、等がある。

現在のところ、上記の(4)の解析手法が、実験結果に対して良い予測を与えると考えられているが、気液間の抵抗を考慮していない等の物理モデル上の問題点や上部境界条件としてチャネリング条件のみを考慮しているためデブリベッドの上部が閉塞されてチャネリングが生じ得ないような場合の取り扱いができなかったり粒子径分布があるような場合の取り扱いができない等、実際に適用する場合の不備があった。

本報告書において述べる損傷炉心冷却挙動解析プログラムは、以上の問題点を改善するため、気相・液相に対する運動方程式において層流・乱流の抵抗、気液間の抵抗、加速損失、気液間の圧力差等物理的に考慮しうる力を全て考慮するとともに、上部境界条件としてチャネリング条件だけでなく上部が固定されたような状況に対する条件を考慮できるようにするとともに異なる粒子径の粒子が混合している場合の取り扱いもできるようにし、現状において可能な限り実現象に近い状況での解析が可能であるようにしたものある。本報告書においては、既存のデータを用いて行った本損傷炉心冷却挙動解析プログラムの性能評価結果についても併せて報告する。

2. 解析モデル

2.1 ドライアウト現象

デブリベッド内においては、残留崩壊熱による沸騰によって気相と液相が混在して存在する二相流状態となる。十分な量の液相が存在し続ければ二相流状態であっても冷却は確保される。しかしながら、上昇する気相により液相が抵抗を受け、除熱に必要な十分な液相流量が確保されないような場合、デブリベッド内にドライな部分ができる、温度の上昇が生じる。このような現象をドライアウトと称しているが、ドライアウトの生じる限界を与える基準変数として次のようなドライアウト熱流束 q_{DR} が定義されている⁽⁶⁾。

$$q_{DR} = \frac{Q_T}{A} = Q \cdot H \quad , \quad (1)$$

ここで、 Q_T はドライアウトが発生した時のデブリベッドからの全発熱量 (w)、 Q は発熱密度 (w/m^3)、 A はデブリベッド断面 (m^2)、 H はデブリベッドの高さ (m) である。

損傷炉心の冷却性は、デブリベッドから放出される崩壊熱による熱流束が、このドライアウト熱流束より大きいか小さいかにより判定することができる。

2.2 基礎方程式

圧力、流量、粒子径等の与えられた諸条件におけるデブリベッド中の任意の位置におけるドライアウト熱流束を計算するためには、ドライアウトに至るまでのデブリベッド内の二相流动状況を記述することが必要となる。本解析においてはデブリベッド内における二相流动状態を計算するために高さ方向に関する1次元の相分離流モデル (separated flow model) を採用した。その基礎方程式は、次のように示される。

$$\rho_g V_g + \rho_1 V_1 = \rho_1 V_{10} = w, \quad (2)$$

$$\rho_g V_g \frac{dV_g}{dz} + \frac{\rho_g}{\eta \eta_g} V_g |V_g| + \frac{\mu_g}{KK_g} V_g + \frac{dP_g}{dz} + \rho_g g + \frac{F_{1g}}{1-s} = 0, \quad (3)$$

$$\rho_1 V_1 \frac{dV_1}{dz} + \frac{\rho_1}{\eta \eta_1} V_1 |V_1| + \frac{\mu_1}{KK_1} V_1 + \frac{dP_1}{dz} + \rho_1 g + \frac{F_{1g}}{s} = 0, \quad (4)$$

$$\rho_g V_g h_{1g} = \int Q dz = Q z \quad (5)$$

$$P_c = P_g - P_1 \quad (6)$$

ここで、 z はデブリベッド下部からの高さ (m)、 ρ は密度 (kg/m^3)、 V は流速 (m/s)、 w は冷却材質量流速 ($kg/m^2 \cdot s$)、 η は乱流透過率 (m)、 μ は粘性係数 ($Pa \cdot s$)、 K は層

流透過率 (m) , P は圧力 (Pa) , g は重力加速度 (m/s) , F_{1g} は相間摩擦力 (kg/s · m) , s はある高さにおける流体体積に占める水の割合 (水率 : saturation) , h_{1g} は蒸発潜熱 (w/kg) , Q は発熱密度 (w/m³) , P_c は気液間の圧力差 (Pa) である。添え字の 1 及び g はそれぞれ液相, 気相を表す。また, (2)式は質量保存の式, (3)及び(4)式はそれぞれ気相・液相に関する運動量保存則であり, (3)及び(4)式中の第 1 項から第 6 項までは, それぞれ加速損失項・乱流摩擦損失項・層流摩擦損失項・圧力損失項・重力項・相間摩擦損失項を表わす。(5)式はエネルギー保存の式, (6)式は気液間の圧力差に関する式である。

2.3 物理モデル

2.3.1 加速損失

(3), (4)式中の等一項は, デブリベッド内を流れる流体の運動量の変化に起因する加速損失の影響を与えるものである。流量変化が小さい場合には, 無視することができる。

2.3.2 相間摩擦

F_{1g} は気液間の相間摩擦を表わす。デブリベッドを通過する気液二相流体は, 粒子による抵抗と異相間の摩擦による抵抗を受ける。相間摩擦の影響は粒子径が大きくなるにしたがい無視できなくなると考えられる。デブリベッド中の相間摩擦の影響については, Schulenberg と Müllerにより, 以下のような定式化がなされている⁽⁷⁾。

$$F_{1g} = W(s) \frac{\rho_1^2 K}{\eta \sigma} \left(\frac{V_g}{1-s} - \frac{V_1}{s} \right)^2 \quad (7)$$

$$W(s) = 350 s^7 (1-s) \quad (8)$$

ここで, (8)式は, 空気 - 水及び空気 - エタノールによる実験によって, 粒径 2.5 から 5.7 mm の範囲の均一粒子によって構成されている充填層に対して Fig. 2.1 に示すように求められたものである。

2.3.3 透過率

η , K はそれぞれ乱流・層流に関する透過率 (permeability) で, Ergunにより次式で与えられている⁽⁹⁾。

$$\eta = \frac{d_p^2}{1.75} \cdot \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon}, \quad (9)$$

$$K = \frac{d_p^2}{150} \cdot \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2}, \quad (10)$$

ここで, d_p は充填粒子径である。

2.3.4 比透過率 (relative permeability)

(3)及び(4)式中の η_g , η_l , K_g , K_l は気相及び液相に対する乱流及び層流の比透過率 (relative permeability) で、相分離流モデルで充填層内の二相流を記述する場合、気液各相における透過率を決定するために用いられ、Lipinskiにより次式のように与えられている⁽⁹⁾。

$$\eta_g = (1 - s)^3, \quad (11)$$

$$\eta_l = s^3, \quad (12)$$

$$K_g = (1 - s)^3, \quad (13)$$

$$K_l = s^3. \quad (14)$$

(11)及び(12)式で表される乱流の比透過率中の指数については、現在 3 ではなく 5 が提唱されている⁽⁶⁾。

2.3.5 気液間の圧力差

(6)式中の P_c は、気液間の圧力差を表すもので、基本モデルで毛管力 (capillary force) により決定できるとして、Leverett により以下の式で与えられている⁽¹⁰⁾。

$$P_c = \frac{\sqrt{150} \sigma (1 - \epsilon) G(s)}{\epsilon d} \quad (15)$$

(15)式中の $G(s)$ は、Fig. 3.2 から Leverett の関数として次式が提案されている。

$$G(s) = \frac{(s^{-1} - 1)^{0.175}}{\sqrt{5}} \cdot \cos \theta \quad (16)$$

(16)式中の θ は気液の接触角である。

(16)式とは別の考え方から、以下のようにして $G(s)$ の表式が求まる。気相側の曲率半径を r_1 、形状因子を ζ とすると、気液間の圧力差 P_c は次式で表される。

$$P_c = \zeta \cdot \sigma / r_1$$

ここで、水力等価直径を D_h として、

$$r_1 = D_h \sqrt{s} / 2.$$

$$\text{及び } D_h = \frac{1}{6} \cdot \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \cdot d_p,$$

であるから、

$$P_c = 12 \cdot \zeta \cdot \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \cdot \frac{\sigma}{d_p} \cdot \frac{1}{\sqrt{s}},$$

となる。従って、(10)式より、

$$\frac{P_c}{\sigma} \cdot \left(\frac{K}{\epsilon} \right) = \frac{12}{\sqrt{150}} \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{s}} ,$$

上式から、Fig.2.2に対する近似として、形状因子 $\zeta = 0.25$ とすることにより次式が得られる。

$$G(s) = \frac{\sqrt{6}}{10} \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} , \quad (17)$$

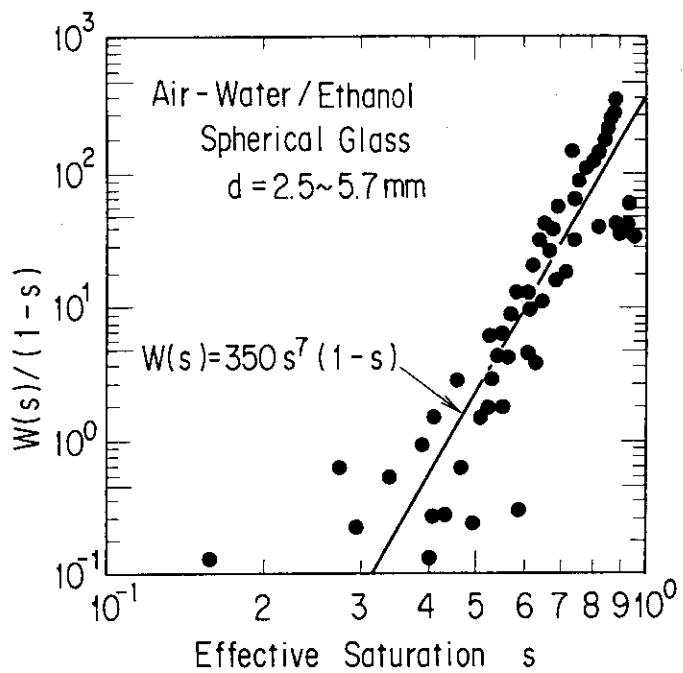


Fig. 2.1 相関摩擦の水率依存性

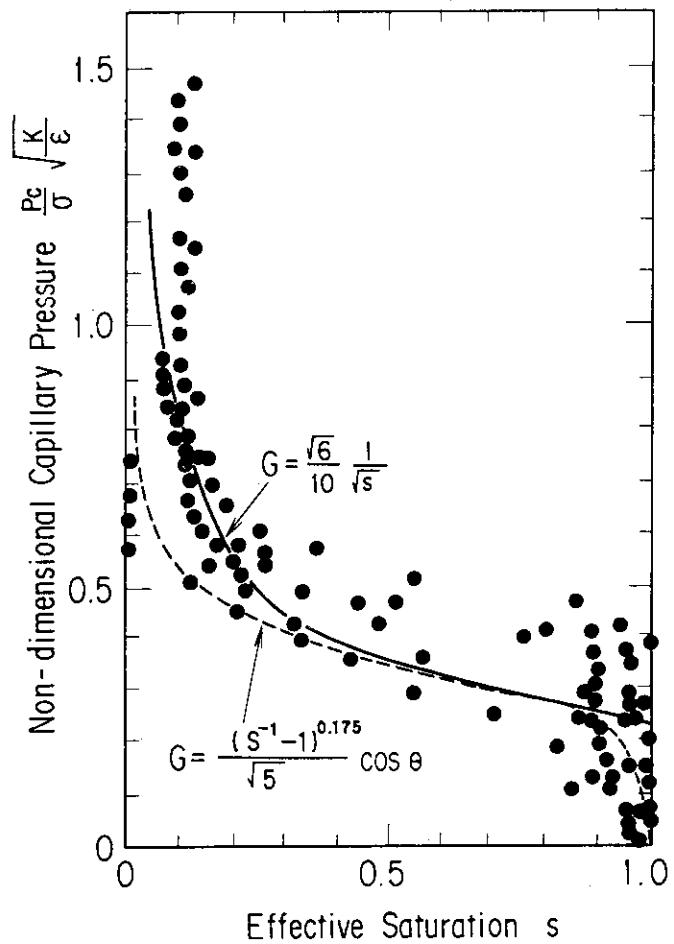


Fig. 2.2 気液間の圧力差に関する実験データ

3. 解析手法

3.1 計算式

(2)から(6)式の基礎式に(7)から(17)式の物理モデルを組み合わせることにより、デブリベッドの各高さにおける水率(saturation)を計算することができる。まず、(6)式、(15)式を z で微分することにより次式が得られる。

$$\frac{d P_c}{d z} = \frac{d P_g}{d z} - \frac{d P_1}{d z} = \frac{P_c}{G(s)} \cdot \frac{d G(s)}{d s} \cdot \frac{d s}{d z} - \frac{P_c}{d_p} \cdot \frac{d d_p}{d z}. \quad (18)$$

(18)式及び(2)、(3)式より、圧力項を消去することにより次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{P_c}{G(s)} \cdot \frac{d G(s)}{d s} \cdot \frac{d s}{d z} - \frac{P_c}{d_p} \cdot \frac{d d_p}{d z} \\ &= \rho_1 V_1 \frac{d V_1}{d z} - \rho_g V_g \frac{d V_g}{d z} \\ &+ \frac{\rho_1}{\eta \eta_1} |V_1| V_1 - \frac{\rho_g}{\eta \eta_g} |V_g| V_g \\ &+ \frac{\mu_1}{KK_1} V_1 - \frac{\mu_g}{KK_g} V_g \\ &+ \frac{F_{1g}}{s} - \frac{F_{1g}}{1-s} \\ &+ \rho_{1g} - \rho_g g. \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、(19)式中の V_g 、 V_1 は、(4)、(5)式より以下のように求まる。

$$V_g = \frac{Q z}{\rho_g h_{1g}}, \quad (20)$$

$$V_1 = V_{10} - \frac{Q z}{\rho_1 h_{1g}}, \quad (21)$$

また、その微分は、(20)、(21)式より、以下のように求まる。

$$\frac{d V_g}{d z} = \frac{Q}{\rho_g h_{1g}}, \quad (22)$$

$$\frac{d V_1}{d z} = - \frac{Q}{\rho_1 h_{1g}}, \quad (23)$$

(19)式により表される1次元の微分方程式を解くことにより、デブリベッド中のある高さにおける水率を求めることができ、この水率が0になるときの熱流束をドライアウト熱流束として求める。

3.2 計算方法

具体的な計算方法は、(19式から ds/dz を求め、以下の様なオイラー法による数値計算を、チャネリング部の底部高さ位置 $z=z_c$ ($s=s_0$) から二相流領域の底部高さ位置 $z=h_s$ までの間で行うことにより、ある高さにおける水率 s_i を求める。

$$s_i = s_{i+1} - \frac{ds}{dz} \Delta z, \quad (i=n \rightarrow 1) \quad (24)$$

また、

$$z_i = z_{i+1} - \Delta z. \quad (25)$$

ただし、(19式より

$$\frac{ds}{dz} = \frac{A + B + C + D + E + F}{\frac{P_c}{G(s)} \cdot \frac{dG(s)}{ds}} \quad (26)$$

ここで、

$$A = \rho_1 V_1 \frac{dV_1}{dZ} - \rho_g V_g \frac{dV_g}{dz},$$

$$B = \frac{\rho_1}{\eta \eta_1} |V_1| |V_1| - \frac{\rho_g}{\eta \eta_g} |V_g| |V_g|,$$

$$C = \frac{\mu_1}{KK_1} V_1 - \frac{\mu_g}{KK_g} V_g,$$

$$D = \rho_1 g - \rho_g g,$$

$$E = \frac{F_{1g}}{s} - \frac{F_{1g}}{1-s},$$

$$F = \frac{P_c}{d_p} \cdot \frac{dd_p}{dz}.$$

3.3 ドライアウトの判定条件

各高さにおける、水率 s を求め、 $s < 0$ になったときドライアウトが生じたとみなす。この時、ドライアウト熱流束を正確に判定するため、Fig. 3.1 に示すような計算ロジックを組んだ。即ち、

- ① (デブリベッド下部からサブクール水を供給する場合) $z_{sub} \geq h$, あるいは
 - ② $0 < z_c \leq z_{sub}$, あるいは
 - ③ ドライアウトが生じない
- 場合、Qの値を大きくし、逆に、
- ① $s_0 \leq 0$, あるいは

- ② $z_c \leq 0$, あるいは
- ③ ドライアウトが生じた

場合、デブリベッドの発熱密度Qの値を小さくすることによってドライアウト熱流束を求める。ドライアウトを検出する前は、Qの値は2倍ずつ増やすが、一度ドライアウトを検出した後は、Qの変化分 ΔQ の値を半分ずつ減らしてゆき、Qがある値に収束するまで計算を続ける。
($\Delta Q < 10^{-8}$)

3.4 物理的諸条件

3.4.1 粒径分布

デブリベッドを構成する粒子の分布は、実際には極めて複雑な分布となる。特に、付録Aで述べるように、冷却水が注入されるタイミングによっては、被覆管のみの微粒化が生じる場合や燃料体自身も微粒化する場合など、極めて多様な分布となる可能性がある。本解析においては、解析上の取り扱いとして、粒子径分布を大きく次の3つに分けて解析が行えるようにプログラムを作成した。一つは同一の粒径の粒子が充填されている場合、一つは異なる粒径の粒子が均一に混合している場合、そして異なる粒径の粒子が各粒径毎に層状に分布している場合である。

(1) 均一粒径の粒子が充填されている場合

(9)式をそのまま解くことにより、ドライアウト熱流束を求めることができる。

(2) 異なる粒径の粒子が均質に混合している場合

均質混合の場合は(9)、(10)式の透過率を、粒径分布の標準偏差 σ_g を用いた次の式に置き換えることによりドライアウト熱流束が求まる⁽¹¹⁾。

$$\eta = \frac{d}{1.75} \cdot \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon} \exp(-1.8\sigma_g), \quad 27$$

$$K = \frac{d^2}{150} \cdot \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \exp(-1.95\sigma_g). \quad 28$$

(3) 層状分布

Fig. 3.2 のように、n 層からなるデブリベッドがある場合、各層ごとに ϵ 、 η 、 K を求めるとともに、以下の式により $d d_p / dz$ を計算して、(26)式の計算を行いドライアウト熱流束を求める。

$$\frac{d d_p}{dz} = \frac{d_{p_{i+1}} - d_{p_{i-1}}}{2 h_i} \quad 29$$

3.4.2 境界条件

代表的なデブリベッド内の二相流動状態をFig. 3.3(a), (b)に示す⁽¹²⁾。ベッドの上部が固定されていない場合は図のようにチャンネリング領域が形成される。このチャンネリング領域底部における座標 z_c 及び水率 s_0 がベッド上部の境界条件となる。一方、ベッドの上部が固定されている場合はチャンネリング領域が形成されず、ベッド上の水中における水率をドリフトフラ

ックスモデルにより求め上部境界条件とする。ベッドの下部については、サブクールのある冷却水がベッド内に流入する場合、Fig. 3. 3(b)のように単相流領域が現れる。本解析モデルではドライアウト熱流束を計算する際には二相流領域のみを考慮しているので、サブクール水の沸騰が生じる高さ z_{sub} を下部境界条件として与える。以下に上部・下部それぞれの境界条件の算出方法について述べる。

(1) 上部境界条件

① ベッドの上部が固定されていない場合

チャンネリングが生じ、ベッド内の粒子の粒径がFig. 3. 2に示すような層状分布（層状分布が無いときには $n = 1$ ）の時には、チャネリング領域の各層における気相と液相の差圧はそれぞれ次のように示される。

$$P_{gi} = \{ \rho_p (1 - \varepsilon_i) + \rho_1 \varepsilon_i \} g h_i , \quad (30)$$

$$P_{ti} = \rho_1 g h_i . \quad (31)$$

$z = z_c$ における気相と液相の圧力は、 n から i_c までの各層の差圧と $z = z_{ic}$ から $z = z_c$ における差圧を加えたものに等しいので、

$$P_g = \sum P_{gi} + \{ \rho_p (1 - \varepsilon_{ic}) + \rho_1 \varepsilon_{ic} \} g (z_{ic} - z_c) , \quad (32)$$

$$P_t = \rho_1 g (h - z_c) . \quad (33)$$

したがって、(6)式より

$$z_c = \frac{\sum P_{gi} + \{ \rho_p (1 - \varepsilon_{ic}) + \rho_1 \varepsilon_{ic} \} g z_{ic} - \rho_1 g h - P_c}{\{ \rho_p (1 - \varepsilon_{ic}) + \rho_1 \varepsilon_{ic} \} g - \rho_1 g} \quad (34)$$

また、(32)式を z で微分して

$$\frac{d P_g}{d z} = - \{ \rho_p (1 - \varepsilon_{ic}) + \rho_1 \varepsilon_{ic} \} g . \quad (35)$$

この式と(9)～(13), (20), (22)式から、(2)式の相間摩擦損失項及び加速損失項を無視することにより次式のような Z_c を求める式が得られる。

$$\frac{Q^2 z_c^2}{\eta (1 - s_0)^5 \rho_g h_{1g}^2} + \frac{\mu_g Q z_c}{K (1 - s_0)^3 \rho_g h_{1g}} - \{ \rho_p (1 - \varepsilon_{ic}) + \rho_1 \varepsilon_{ic} - \rho_g \} g = 0 . \quad (36)$$

(34), (36)式を連立することにより Z_c , S_0 が求められる。

② ベッドの上部が固定されている場合

この場合には、チャンネリングが生じないので、

$$z_c = h . \quad (37)$$

である。 S_0 は、ベッド上の水中におけるボイド率 α を以下のドリフトフラックスの式から求めることにより与える⁽¹³⁾。

$$S_0 = 1 - \alpha , \quad (38)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{V_g}{C_0 V + V_r}, \quad 39$$

$$C_0 = \sqrt{2}, \quad 40$$

$$V = (V_g + V_i), \quad 41$$

$$V_r = 3 \left\{ \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \cdot \frac{d(\rho_1 - \rho_g) g}{\rho_1} \right\}^{1/2}. \quad 42$$

(2) 下部境界条件

ベッド内に流入する冷却水がサブクール状態にあるときベッド下部は、デブリベッド内で発生する熱により冷却材が沸騰する高さまでは、単相流のサブクール領域となる。この領域の高さは次式により与えられる。

$$z_{sub} = \frac{\rho_1 V_{10} C_{p1} T_{sub}}{Q}. \quad 43$$

サブクールがないときは $z_{sub} = 0$ となる。サブクールがある場合、(4)式は次のように変化する。

$$\rho_g V_g h_{ig} = Q(z - z_{sub}). \quad 44$$

したがって、 V_g, V_i は 21 式から次のようになる。

$$V_g = \frac{Q(z - z_{sub})}{\rho_g h_{ig}}, \quad 45$$

$$V_i = V_{10} - \frac{Q(z - z_{sub})}{\rho_1 h_{ig}} \quad 46$$

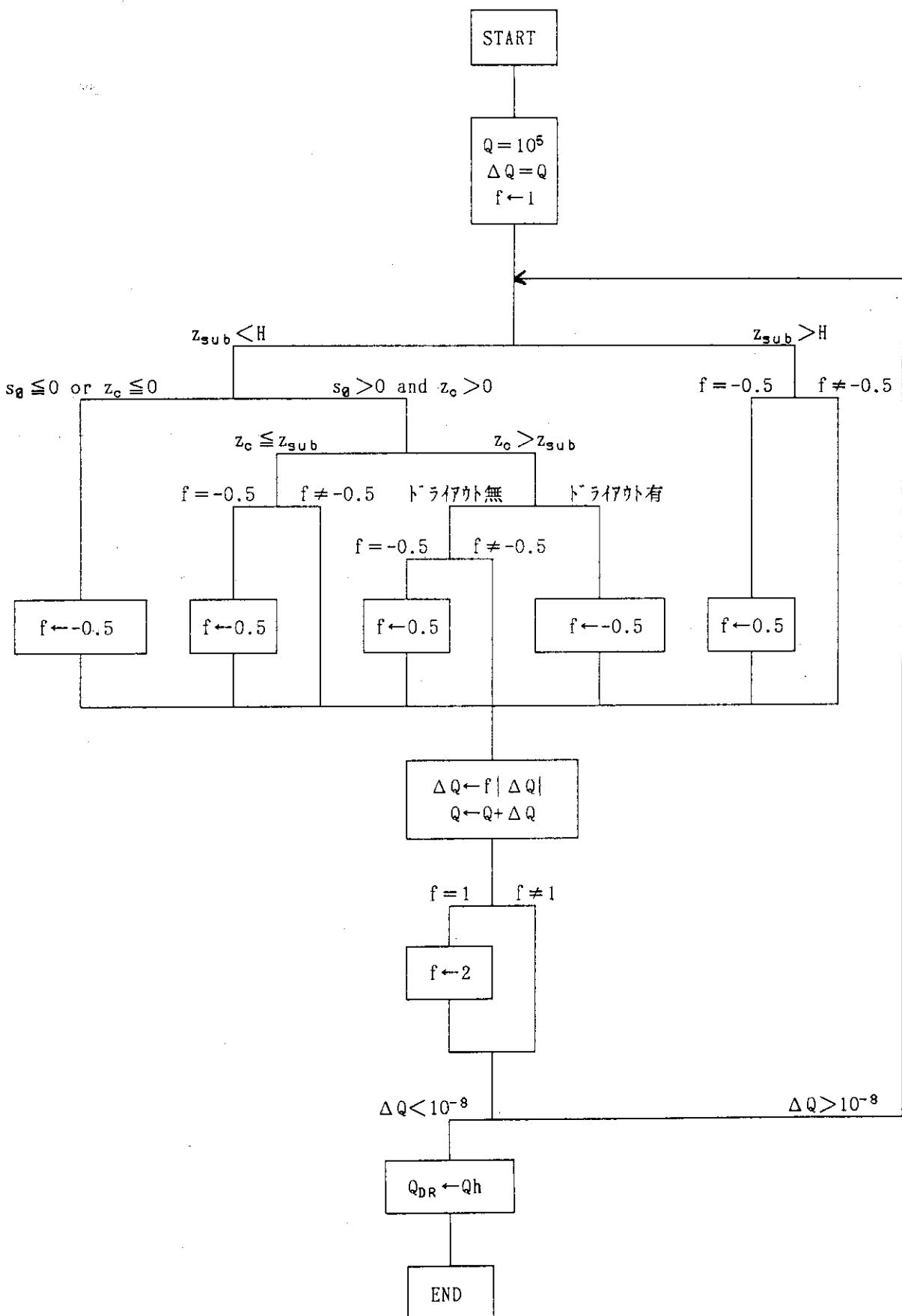


Fig. 3.1 ドライアウト熱流束の判定方法

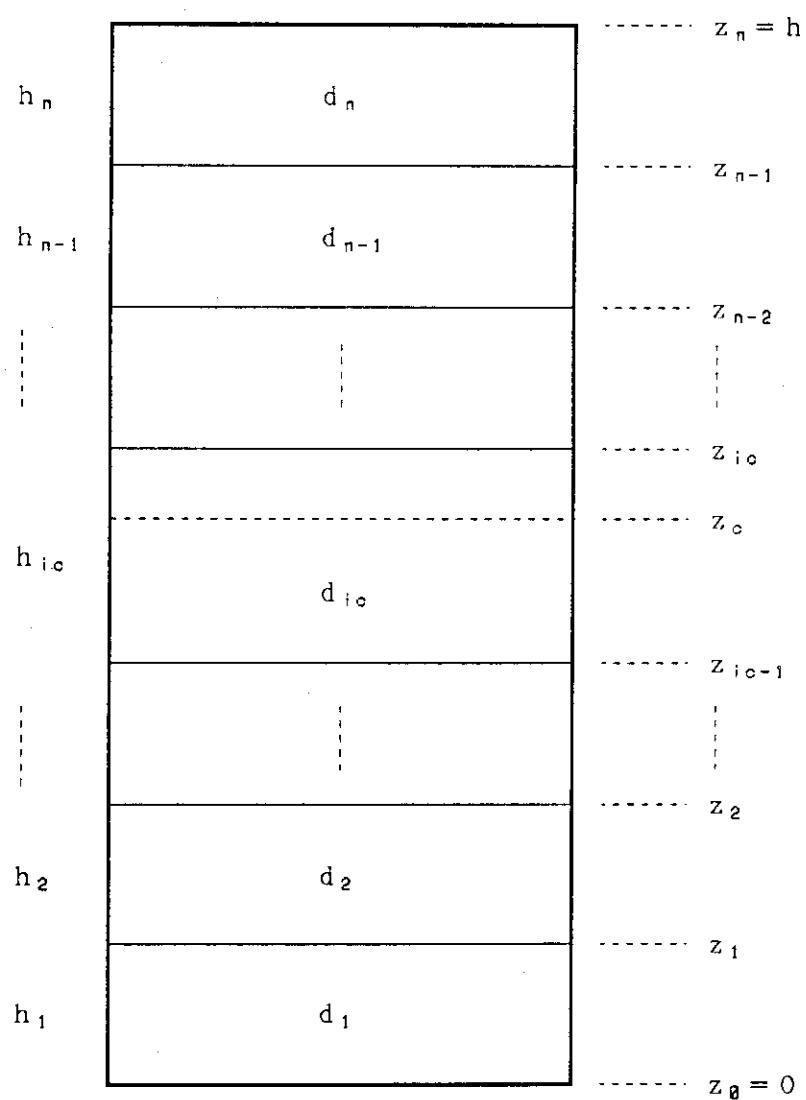
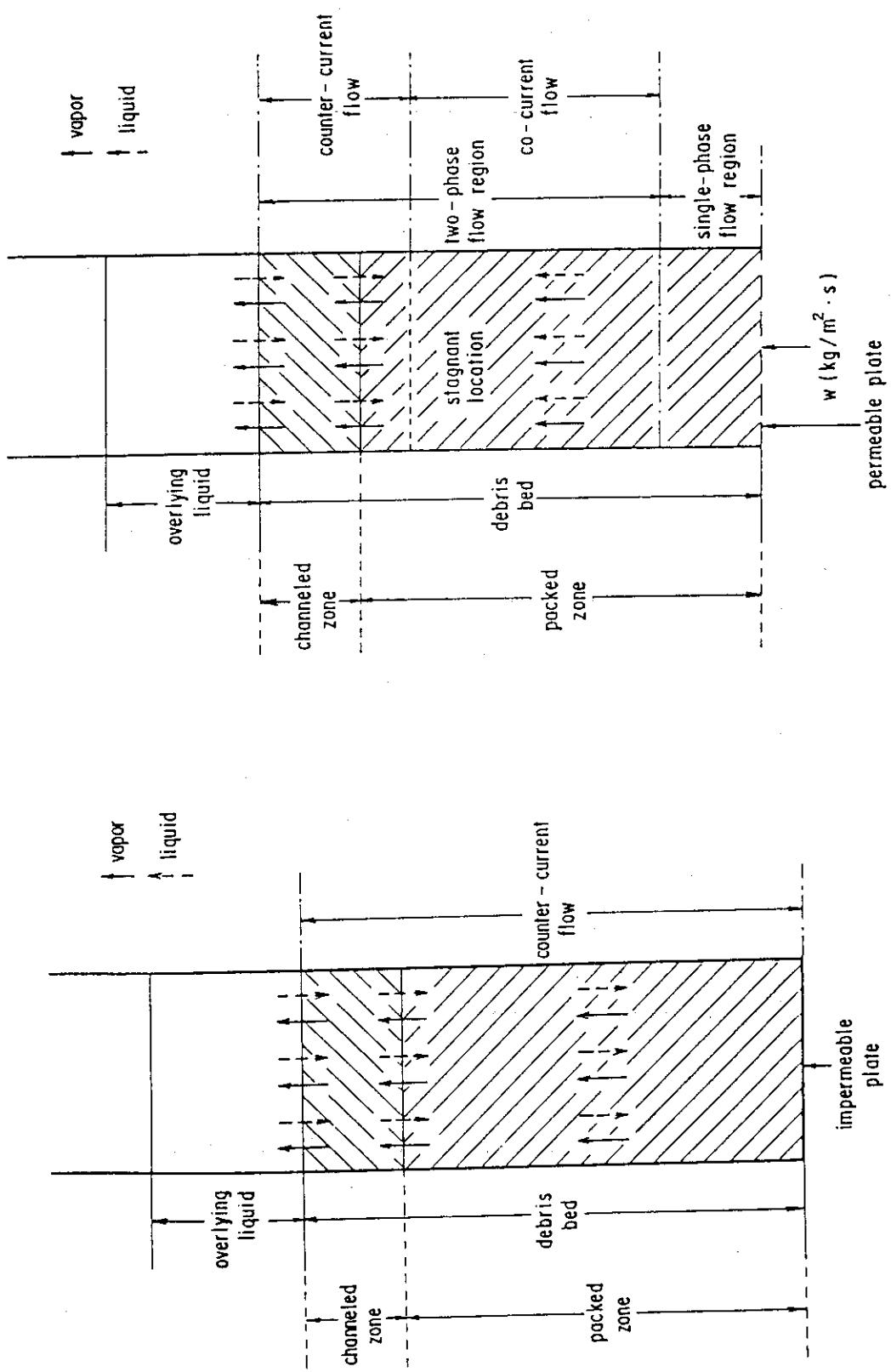


Fig. 3.2 デブリベッド内の粒径分布が層状である場合の概念図



(a) Two-phase flow characteristic in debris bed for
stagnant or top-fed coolant flow condition
(b) Two-phase flow characteristic in debris bed for
bottom-fed coolant flow condition

Fig. 3.3 テブリベッド内の流動状況

4. 損傷炉心冷却挙動実験解析^{(14), (15)}

4.1 物理モデルについての考察

4.1.1 加速損失の効果

(3), (4)式の第一項の加速損失項の影響を調べたものが、Fig. 4.1 (a)～(c) で、加速損失項がある場合と無い場合について、実験データとの比較を行った。Fig. 4.1 (a) は圧力を変化させている。Fig. 4.1 (b) 及び(c) は粒子径を変化させており、それぞれベッド高60mm 及び85mm に対しての計算結果である。実線が加速損失を考慮していない場合、点線が加速損失を考慮していない場合である。圧力及び粒径いずれの変化に対しても、実線と点線はかさなっており、加速損失項がドライアウト熱流束に及ぼす影響が少ないことを示している。また、計算と実験の一致も良好である。

4.1.2 相間摩擦の効果

(2), (3)式においては、第6項で相間摩擦の効果を考慮している。相間摩擦についての物理モデルについては、(7), (8)式が提案されている。この相間摩擦が計算に及ぼす影響を調べるために、相間摩擦を考慮した計算結果と考慮しない計算結果について実験データとの比較を行った。その比較結果を、粒子径を変化させて示したものが、Fig. 4.2 (a)～(b)である。Fig. 4.2 (a) は高さ60 mm に対する計算結果で、Fig. 4.2 (b) は高さ85mm に対する計算結果である。実線が相間摩擦を考慮しない場合、点線が相間摩擦を考慮した場合である。これらの図から、相間摩擦損失を考慮した場合、相間摩擦を考慮しない場合に比較して、粒子が大きくなるにつれてドライアウト熱流束が小さくなっていることがわかる。粒径が小さい範囲では、両者の差は小さく実験との一致も良好である。大きな粒子径においては、相間摩擦を考慮しない場合のほうが、実験データにより近いように見える。しかしながら、粒径が大きくなつた場合、ドライアウト熱流束も大きくなつており、発生蒸気量も増えることから、必然的に相間摩擦も増加し、増加した相間摩擦によってドライアウト熱流束が小さくなるほうが妥当であるように思える。ただし、(7), (8)式が作成されたデータベースの範囲は限られており、本計算結果が定量的に正しいとは必ずしも言えない。ただし、現状において摩擦損失を考慮した計算のほうが、より保守側の評価になっており、考慮しない場合との差が、粒子径が増加するにつれて増してゆくことから、相間摩擦についてはより詳細な検討が必要であると考えられる。

4.1.3 乱流の比透過率の効果

(9), (10)式で表される透過率は Ergun によって提唱されたもので、単相流に対しては良い一致を示すことが確かめられている。透過率を気液各相に分配するための比透過率についても、層流に対しての (13), (14) 式についてはほぼ評価が確立しているものと考えられる。しかしながら、乱流に対する比透過率については、(11), (12) 式の説明において述べたように、

確定的なモデルがはっきりしない。そこで、(11)，(12)式中のnの値を3から6まで変化させて計算し、実験データと比較した結果が、Fig.4.3(a)～(b)で、両図とも粒子径を変化させている。Fig.4.3(a)はベッド高60mmに対しての計算結果で、Fig.4.3(b)はベッド高85mmに対しての計算結果である。これらの図から、nの値が大きくなるほど、ドライアウト熱流束が小さくなり、n=5の場合、最も実験データに近い値となることが分かる。

4.1.4 気液間の圧力差の効果

気液間の圧力差の取り扱いは、(16)式あるいは(17)式により表される関数G(s)に依存する。両者ともFig.3.3のデータに対する近似により得られたものである。(16)式は、気液間の接触角を考慮しており異なる流体に対しても対応できる。一方、(17)式は、Fig.3.3の実験データに対しては、(16)式よりも良い近似になっている。(16)式及び(17)式を用いてドライアウト熱流束を求めた結果がFig.4.4(a)～(b)で、実線が(16)式を用いた場合、点線が(17)式を用いた場合である。図中の白丸は実験データである。両図とも粒子径を変化させており、Fig.4.4(a)はベッド高60mmに対しての計算結果で、Fig.4.4(b)はベッド高85mmに対しての計算結果である。これらの図から、2つのモデルによる計算結果に大きな差はなく、両者とも実験データに近い値を示していることがわかる。ただし、粒子径の大きな範囲においては、実験データより過小な評価になっているが、実験データ自体も大きくばらついている。

4.1.5 まとめ

以上の物理モデルについての考察結果から、加速摩擦損失の効果が小さいこと、相間摩擦損失を考慮することにより予測結果が安全側に見積られること、気液間の圧力差については、モデルの違いがそれほど大きないこと、乱流の比透過率については実験データに対してはn=5が近いことが確かめられた。

4.2 物理的諸条件の検討

4.2.1 粒子径の効果

粒子径の違いによるドライアウト熱流束の変化を調べたものがFig.4.5である。ベッド高をパラメータとして、60m及び85mの場合について計算を行っている。実験データ及び計算結果とともに、粒径が大きくなつてゆくほど、ドライアウト熱流束は大きくなつてゆく。これは、単一粒子を考えた場合、粒子の体積が粒子径の3乗に比例して増加するのに対して、粒子の表面積は粒子径の2乗に比例して増加するため、粒子径が大きい場合、熱エネルギーの流体側への放出割合が、粒子径が小さい場合に比べて小さくなるためと考えられる。粒子径が小さい範囲では、計算結果は、実験値とよい一致を示しているが、粒子径が大きい範囲では、計算値は実験データと比べて小さめの評価になっている。

4.2.2 粒径分布の効果

異なる粒子が充填しているデブリベッドにおける粒径分布については、3.4.1に述べたように、均質に混合している場合と層状に分布している場合を考慮した。

(1) 均質混合の場合

異なる粒子が均質に混合している場合には、(27), (28)式で示したように、透過率に粒子径分布の標準偏差を考慮した式を用いて計算する。標準偏差 0.085, 平均粒径 0.59 mm ($0.6\text{mm}:88\%$, $0.5\text{mm}:12\%$)で圧力を変化させた実験結果と解析モデルとの比較を、Fig. 4.6(a)に示す。図中の丸印がチャネリングのある場合、三角印がチャネリングのない場合の実験結果である。また、実線がチャネリングのない場合の計算結果で、波線がチャネリングのない場合の計算結果である。計算結果はいずれも実験結果より低めの値となっているが、圧力が低い領域では実験と解析の一一致は比較的良く、高圧になるとそのずれは大きくなる。特にチャネリングのある場合には、計算値は実験値より大幅に過小評価となる。この原因として考えられるのは、本解析で使用している透過率を表す式、(27), (28)両式が大気圧状態で実験的に得られたものであり、高圧条件において適応範囲できない可能性が考えられる。また、チャネリングの長さ及びチャンネル底部における水率を求めるモデルは、均一粒径のデブリベッドに対して提案されたものであるので、粒径分布をもったデブリベッドに適応できるかどうかということも問題となるものと考えられる。均質混合のデブリベッドに関しては、今後更に実験データの蓄積と解析モデルの改良を期待しなければならない。

パラメータ計算として、(27)及び(28)式中の標準偏差を 0 から 2 まで変化させて計算した。結果が Fig. 4.6(b)である。標準偏差が大きくなるほど、すなわちより粒子径分布が広い場合ほど、ドライアウト熱流束が小さくなり、容易にドライアウトに至ることがわかる。これは、粒子径分布の範囲が広いほど、密に粒子が充填しており、流体体積が小さくなるためであると考えられる。

(2) 層状分布の場合

圧力 72 気圧で、高さ 50 cm のデブリベッドの下部 40 cm に平均粒径 3.64 mm の粒子を充填し、上部 10 cm に平均粒径 0.92 mm の粒子を充填して行った実験データと同じ条件で行った計算結果を示したものが Fig. 4.7(a) 及び (b) である。Fig. 4.7(a) から、計算によるドライアウト熱流束は $33(\text{kw}/\text{m}^2)$ であるのに対して、実験で測定されたドライアウト熱流束データは $23(\text{kw}/\text{m}^2)$ で、計算結果は実験結果に比較して過小な評価になっていることが分かる。Fig. 4.7(b) から分かるように、上層と下層の境界で、平均粒径の大きな下層から平均粒径の小さな上層に行くに従って水率が急激に減少しており、ドライアウトは、Fig. 4.7(b) から分かるように、上層と下層の境界のやや下側で生じている。

4.2.3 ベッド高の効果

ベッド高を変化させた時のドライアウト熱流束の変化を、粒子径をパラメータとして示したが Fig. 4.8 である。実験データも併せて示してあるが、実験データの傾向をほぼ良く予測している。ドライアウト熱流束は、ベッド高が低い場合には大きく、ベッド高が高くなるにつれて低くなるが、ある高さ以上では、その低下の割合は小さくなる。ベッド高が低い場合、ドライ

アウト熱流束が大きくなるのは、ベッドが低いため発生する気相流量の積分値が小さく、液相の流動を妨げにくくなるためと考えられる。また、粒径が大きい場合、相間摩擦の影響を調べた時と同様、計算値が実験値より低めになっている。

4.2.4 流量の効果

層状分布の検証を行ったときの実験条件に対して、流量を変化させて計算したものがFig. 4.9 (a)である。冷却材流量 $V_{10} = 0$ のところが層状分布の効果を比較したときのデータである。図中には、実験データも併せて示している。計算値と実験データはよく一致しており、流量の効果に対する予測精度が良いことがわかる。

また、Fig. 4.9 (b)には、この実験条件におけるデブリベッド全長に対する差圧を示した。ベッドの全長差圧は、券却材の注入が、主にダウンカマとベッドとの圧力差によって行われることから、損傷炉心の冷却を評価する上では、極めて重要である。この図からベッド全長差圧は、流量が増えるにしたがって、はじめは少し減少し、その後逆に増えはじめることがわかる。下の層と上の層それぞれにおける粒径を使い、均一の分布として計算してみたものが、Fig. 4.9 (c), (d)である。

4.2.5 圧力の効果

圧力を変化させた時のドライアウト熱流束の計算値を実験データとともに示したのが、Fig. 4.10である。Fig. 4.10は粒径 1 mm から 3 mm の粒子が充填されているデブリベッドに対するものである。全体的に計算値は実験データより低めであるが、定性的には実験データと一致していることがわかる。圧力が大きくなるに従って、ドライアウト熱流束は増加し、低圧の時ほど、ドライアウトが生じ易くなっていることが分かる。これは、高圧になるほど気相の比体積が減少し同じ質量流量でも気相流束自体は減少するために液相と気相間の抵抗が減少することによると考えられる。

4.2.6 上部押えの効果

デブリベッドの上部境界の条件として、粒子が自由に動ける場合と何らかの押さえがあるために自由に動けない場合と考えられる。粒子が自由に動ける場合には、デブリベッド上部においては、粒子が気相に押し退けられて気相の通り道ができるチャネリングと呼ばれる現象が生じる。一方、粒子が自由に動けない場合には、そのようなチャネリングは生じない。粒子が自由に動けるためにチャネリングが生じる場合と、上部押えが加わりベッドにチャンネルが生じないときの計算を行い、実験との比較を行った結果がFig. 4.11である。計算値、実験データ共に上部押えがあるときの方がドライアウト熱流束が低くなってしまっており、上部に何らかの押えがある場合には、よりドライアウトが生じ易くなっていることが分かる。

4.2.7 サブクールの効果

冷却材のサブクールがドライアウト熱流束に及ぼす影響を計算した結果をFig. 4.12(a), (b)に示す。Fig. 4.12(a)は、圧力大気圧、高さ 50 cm、粒径 2.3 mm、冷却材流速 1.3 mm/s 及

びサブクール 40°C の場合の計算結果である。図より明らかなように、水率が 1 となる高さは、ベッドの底部ではなく、底部からある高さだけ上の位置になっていることが分かる。ただし、その水率が 1 となる高さは、発熱密度が大きくなるに従って低くなることから、ドライアウトが生じるような、高い発熱密度の場合には、ほぼベッド底部に近い位置となっていることが分かる。Fig. 4.12(b) は、Fig. 4.12(a) の条件で、サブクールを 0°C から 40°C まで変化させた場合のドライアウト熱流束の計算結果である。サブクールが大きくなるほどドライアウト熱流束も大きくなるほどドライアウト熱流束も大きくなっているが、その変化は大きくない。これは、Fig. 4.12(a) から分かるように、ドライアウトが生じるような、高い発熱密度の場合には、サブクール単相領域が短くなり、デブリベッド中の沸騰に及ぼす影響が小さくなるためと考えられる。

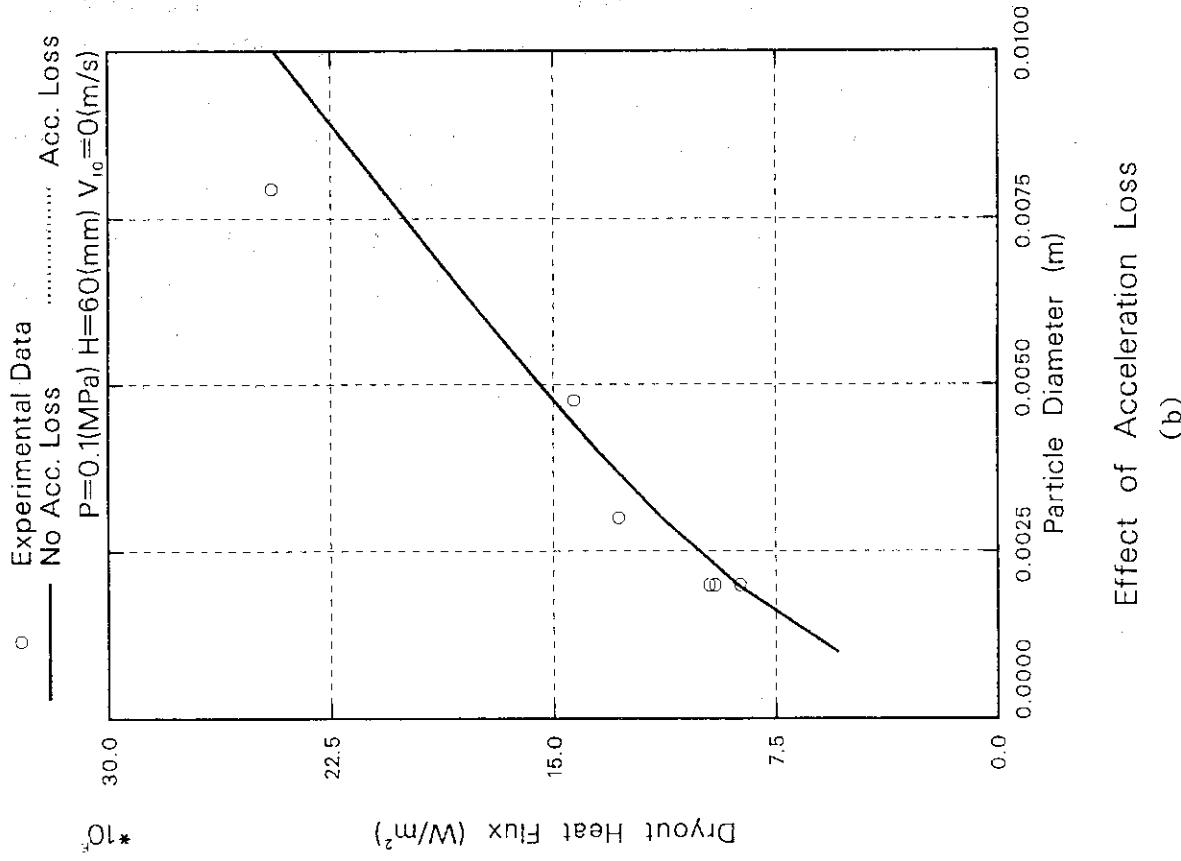
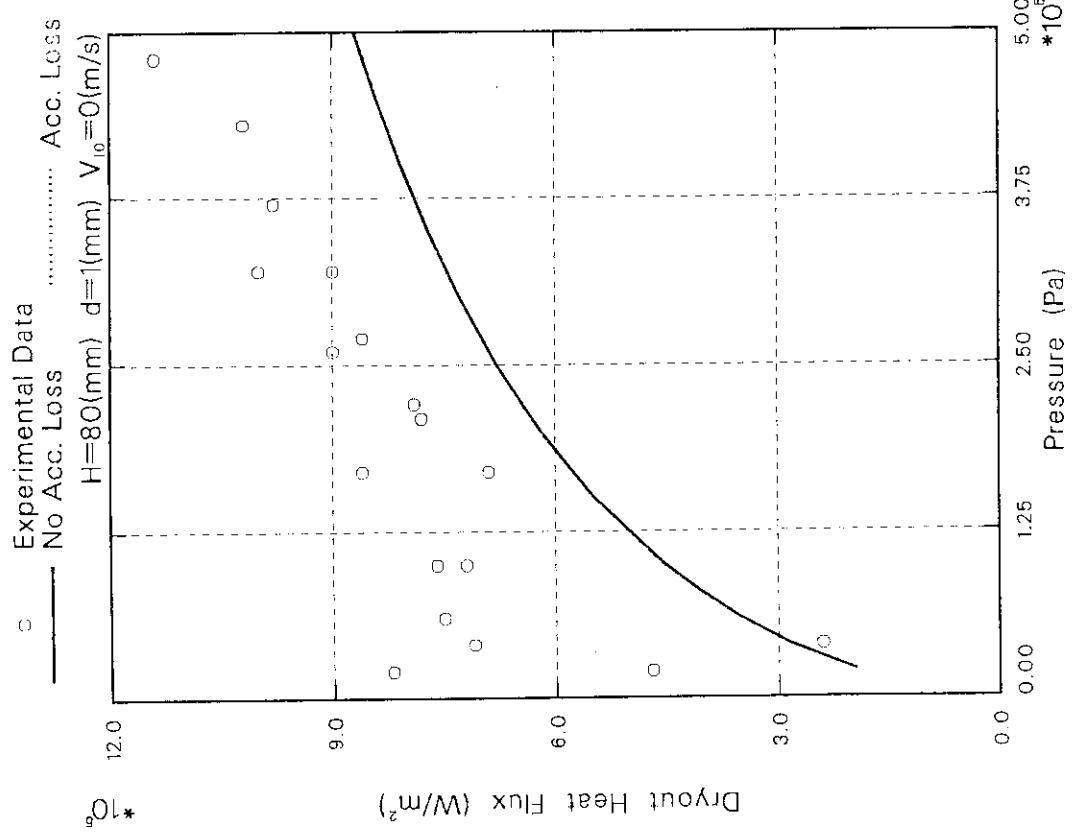


Fig. 4.1 加速損失の効果

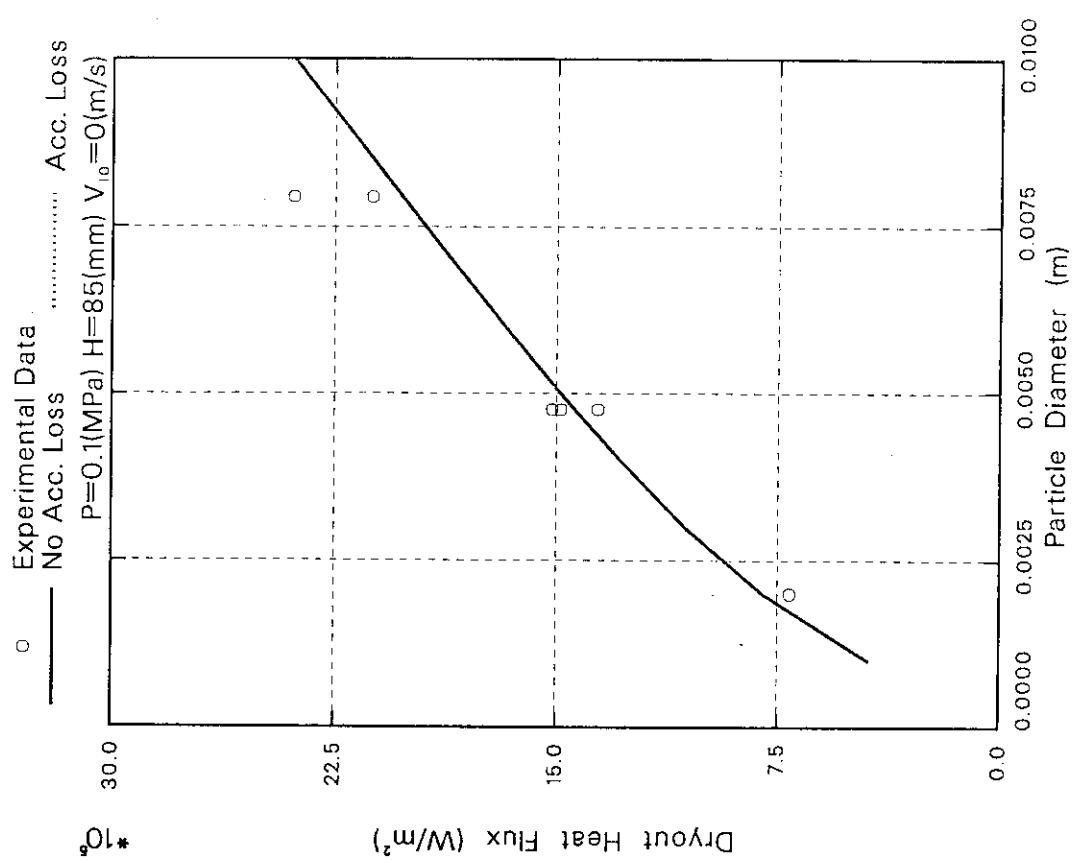


Fig. 4.1 (続き)

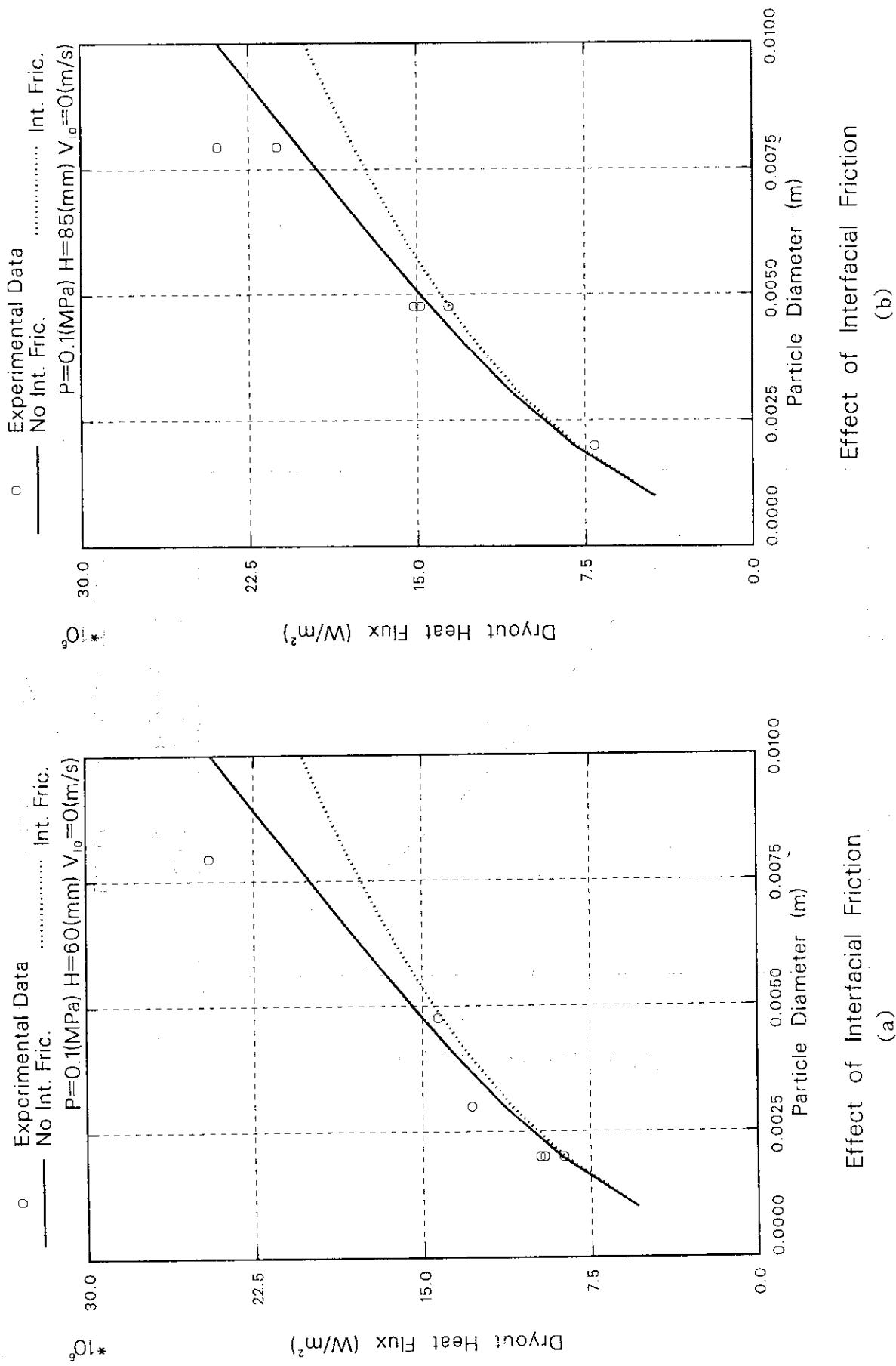
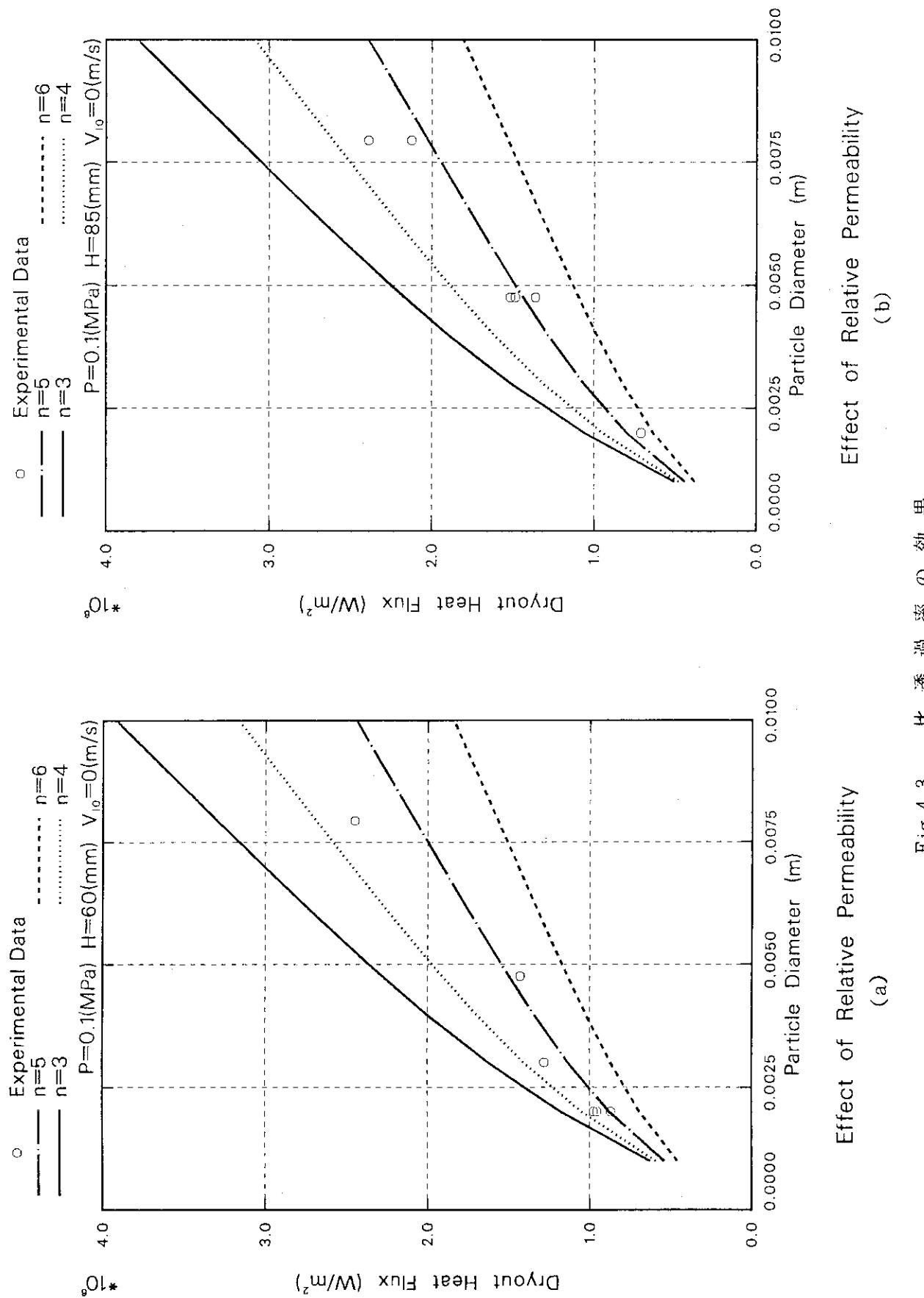
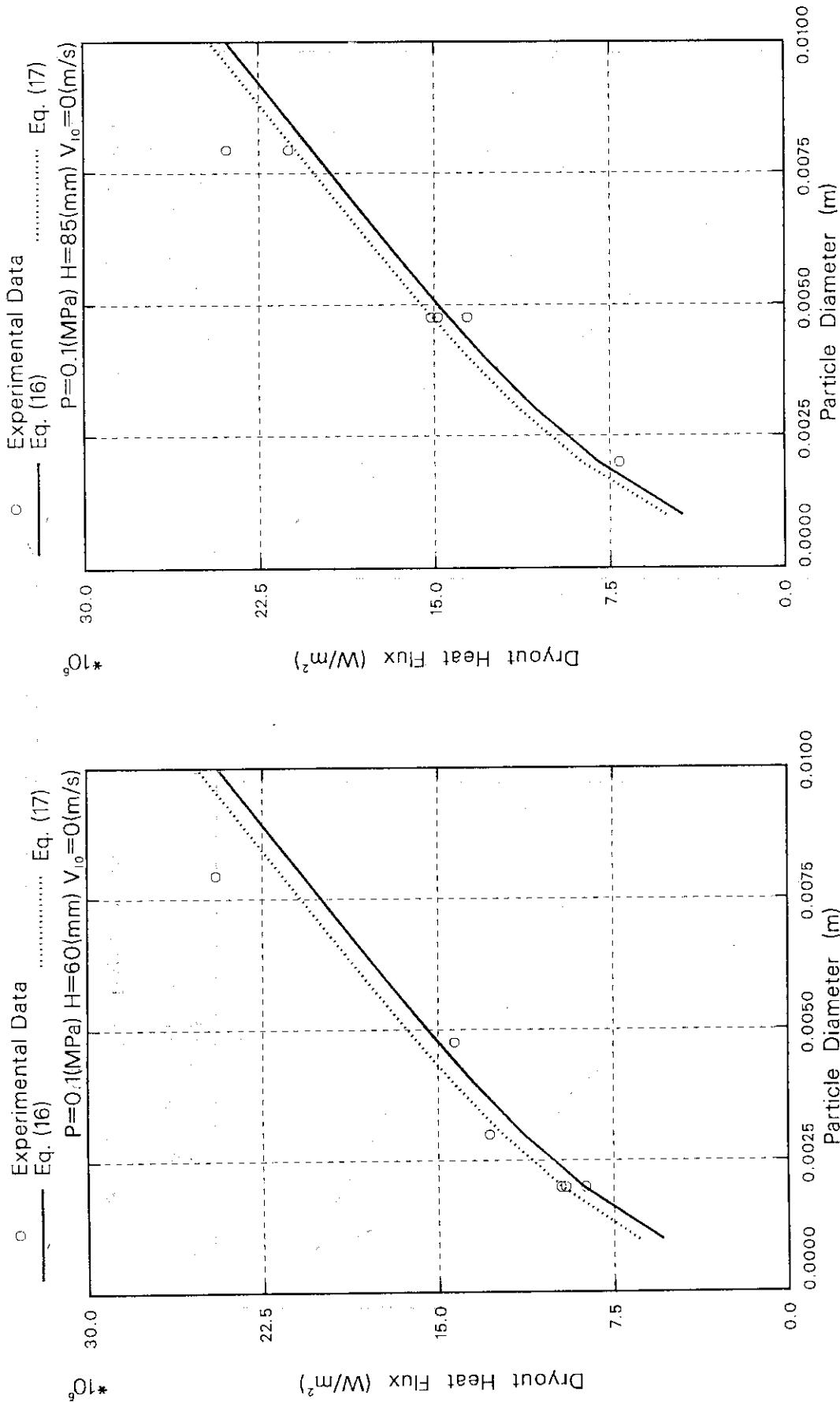


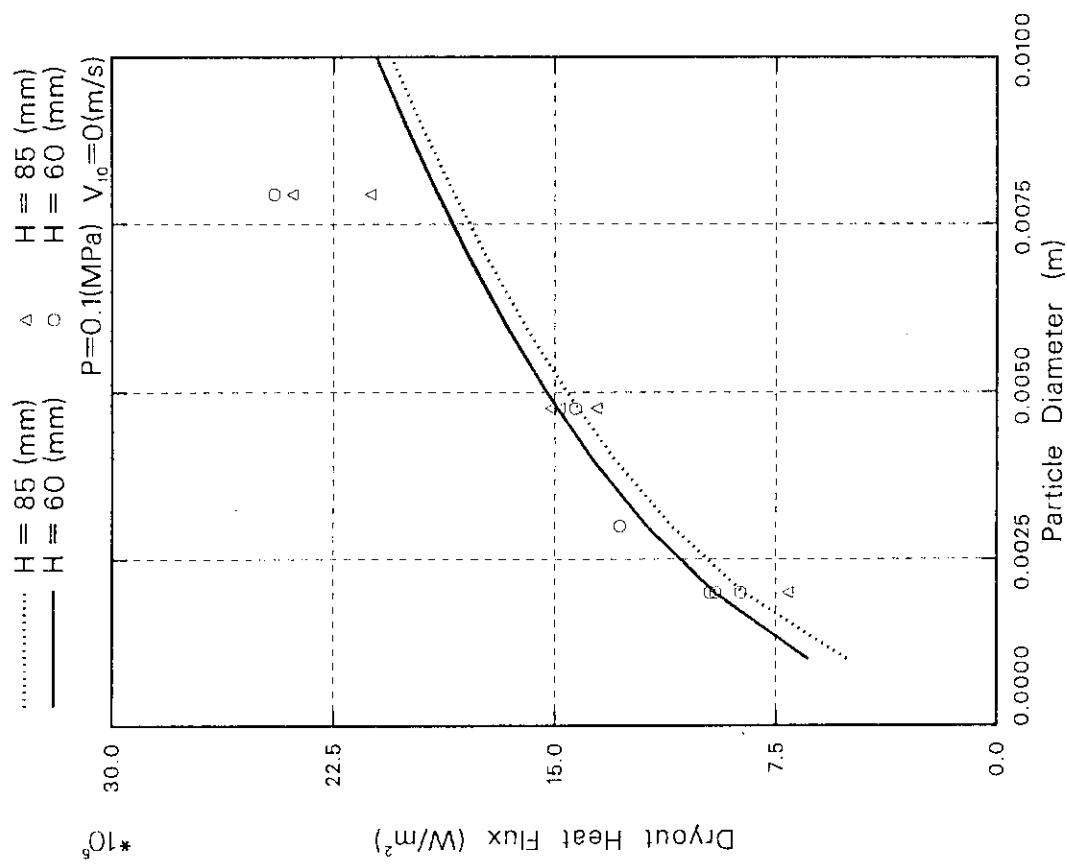
Fig. 4.2 相間摩擦の効果

Effect of Interfacial Friction
(a)

Effect of Interfacial Friction
(b)



Fig. 4.4 気液間の圧力差の効果
(a) (b)



Effect of Particle Diameter

Fig 4.5 粒子径の効果

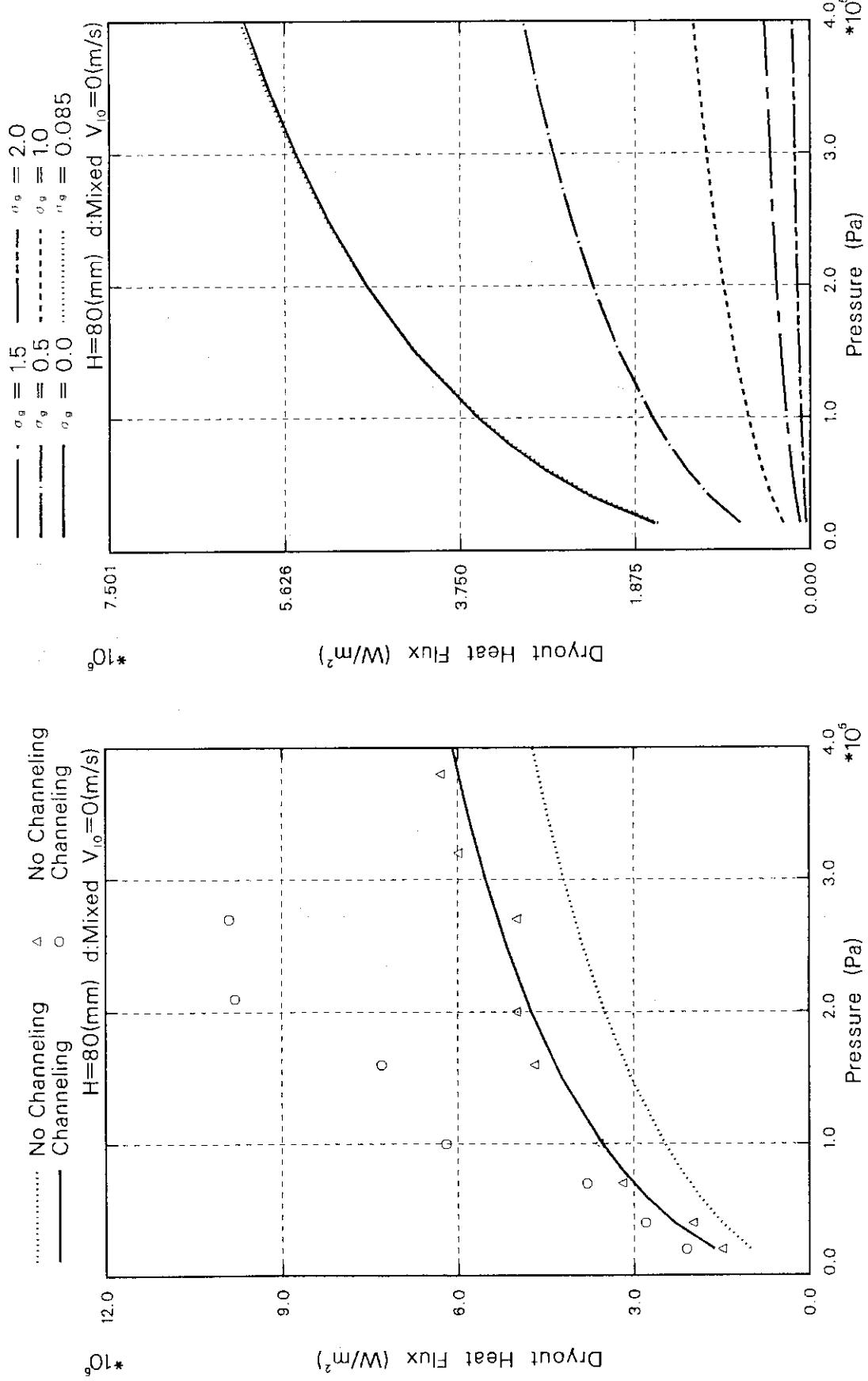


Fig. 4. 6 粒径分布の効果(均質混合の場合)

(a)
(b)

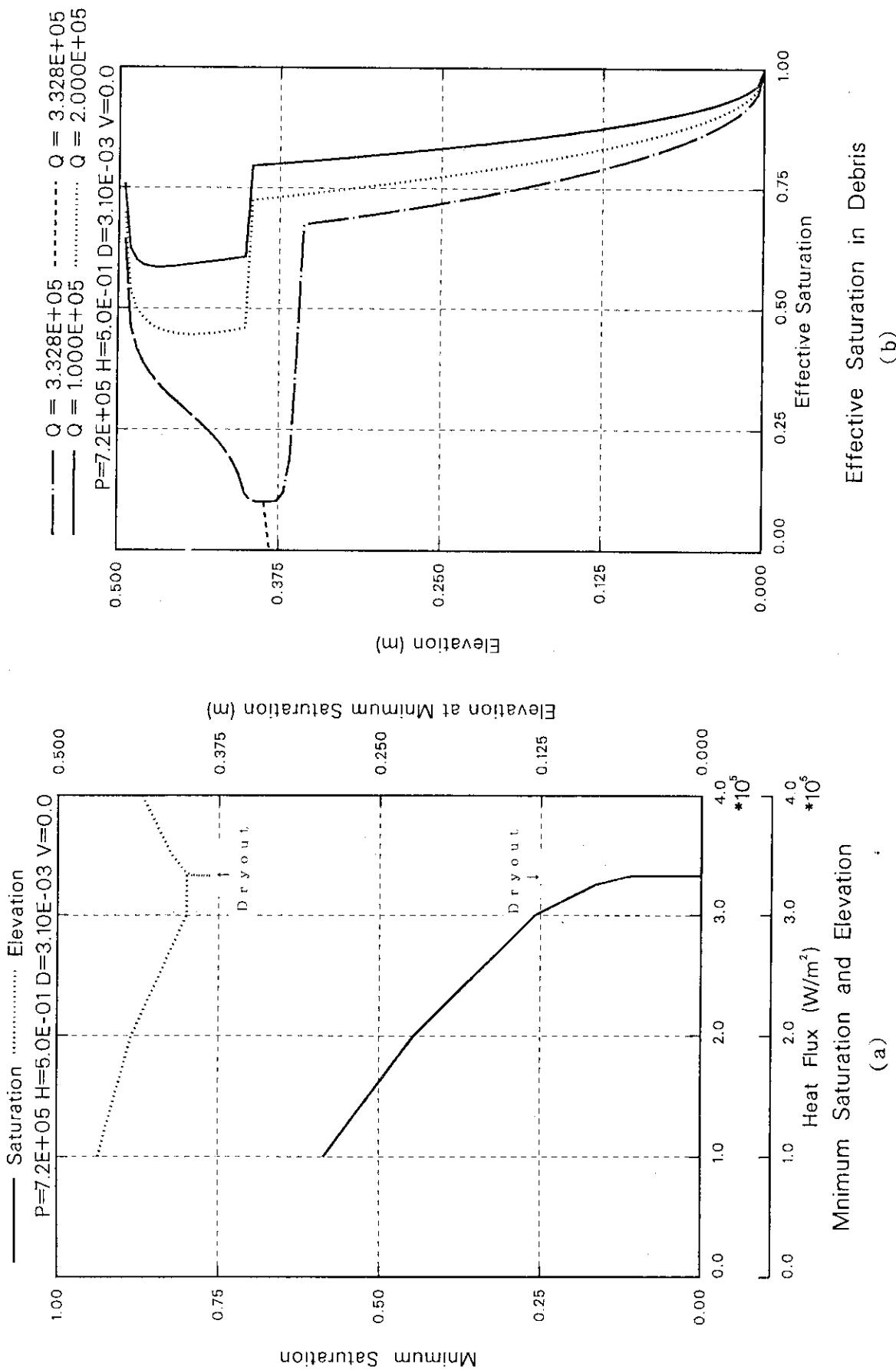


Fig. 4.7 粒径分布の効果（層状分布の場合）

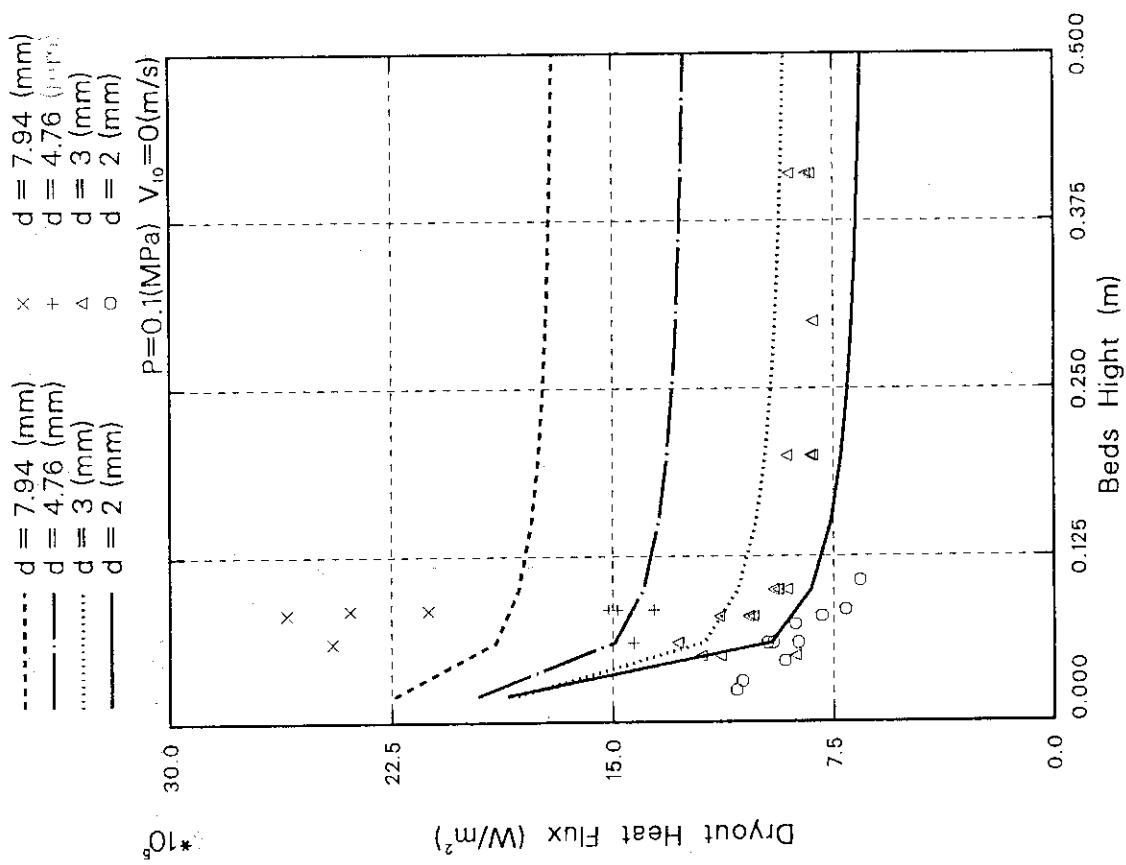
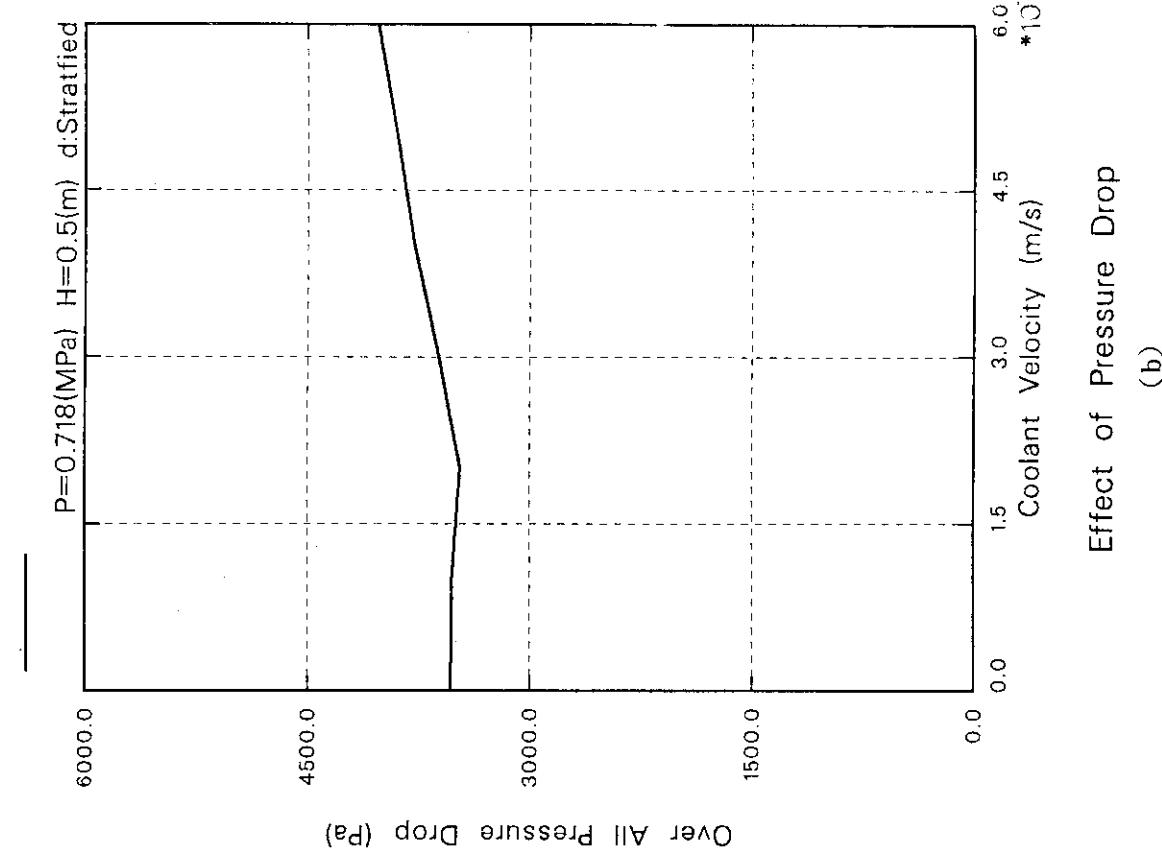
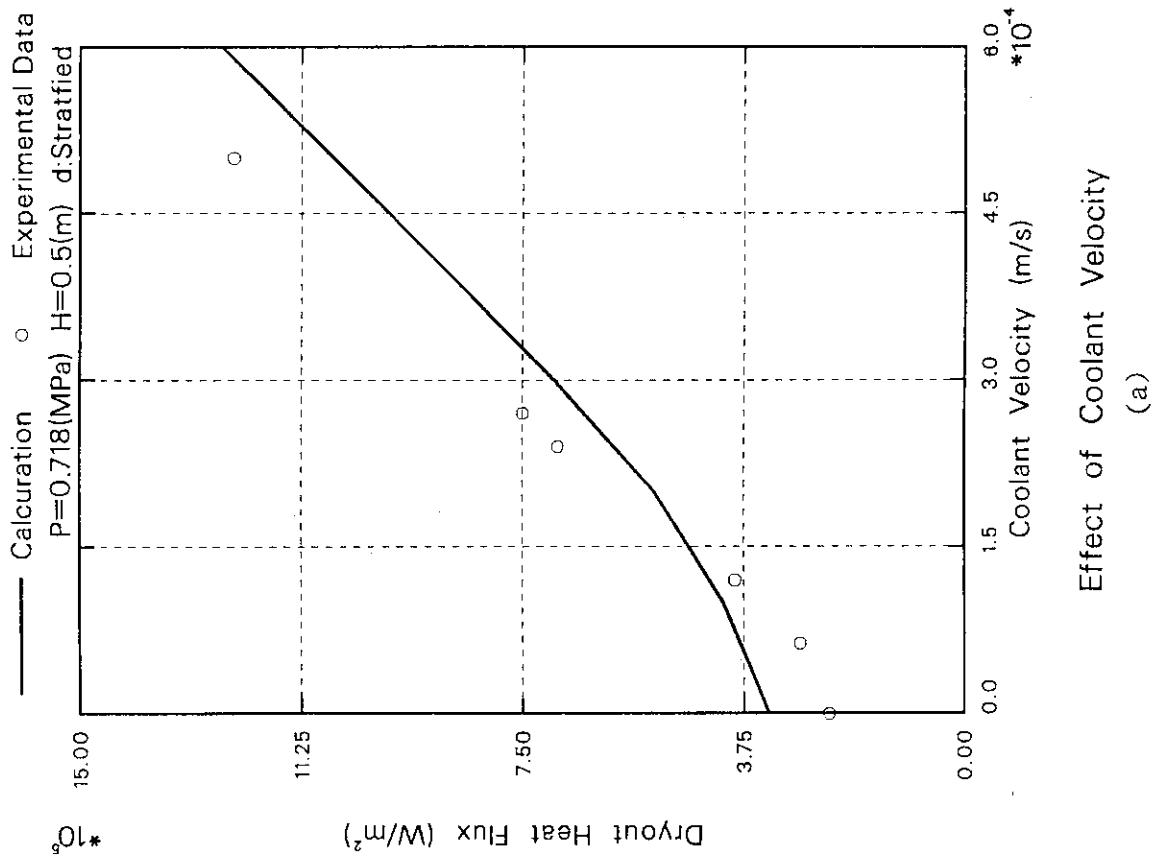


Fig. 4.8 ベッド高の効果
Effect of Bed Height



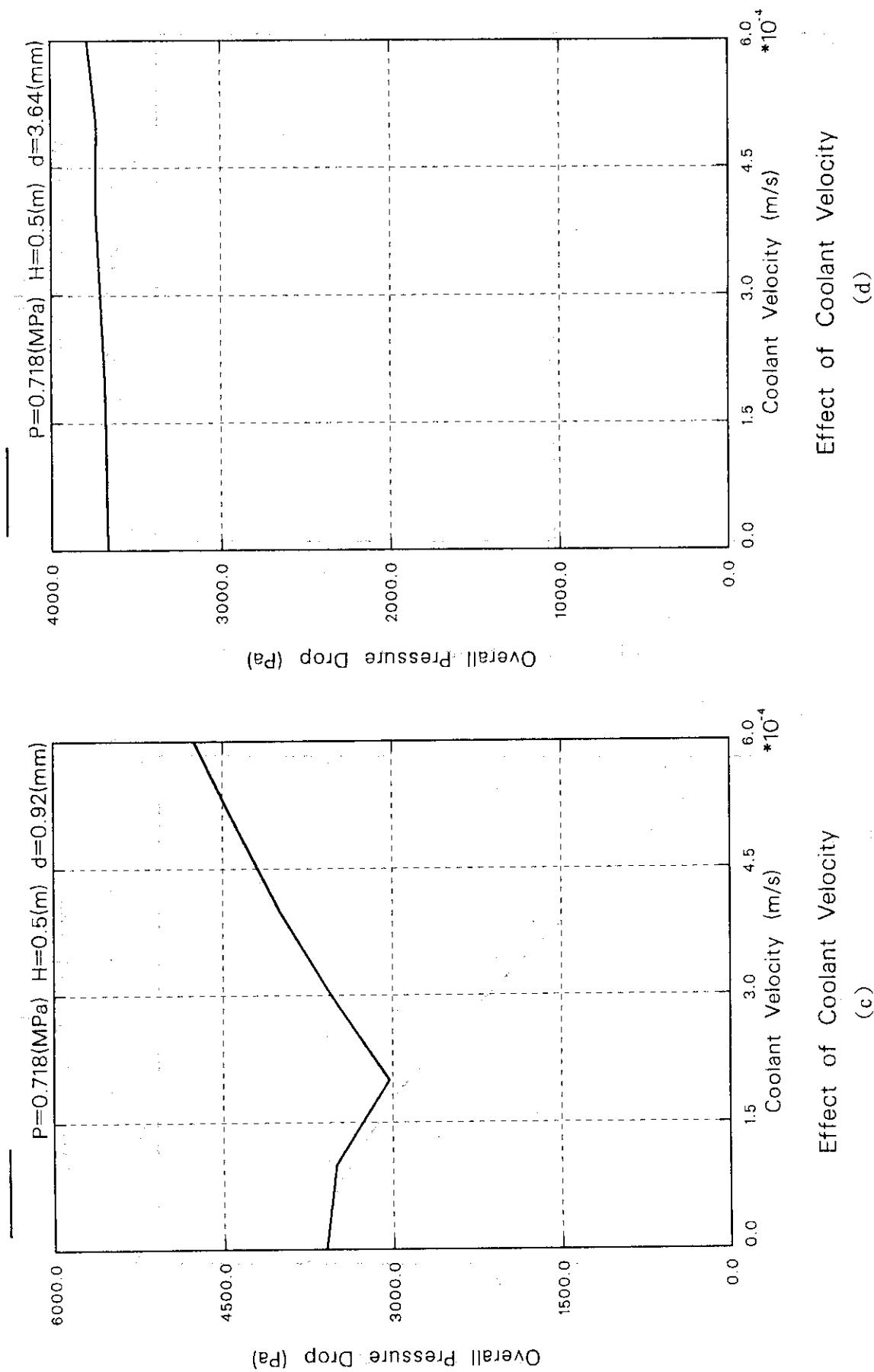


Fig. 4. 9 (続き)

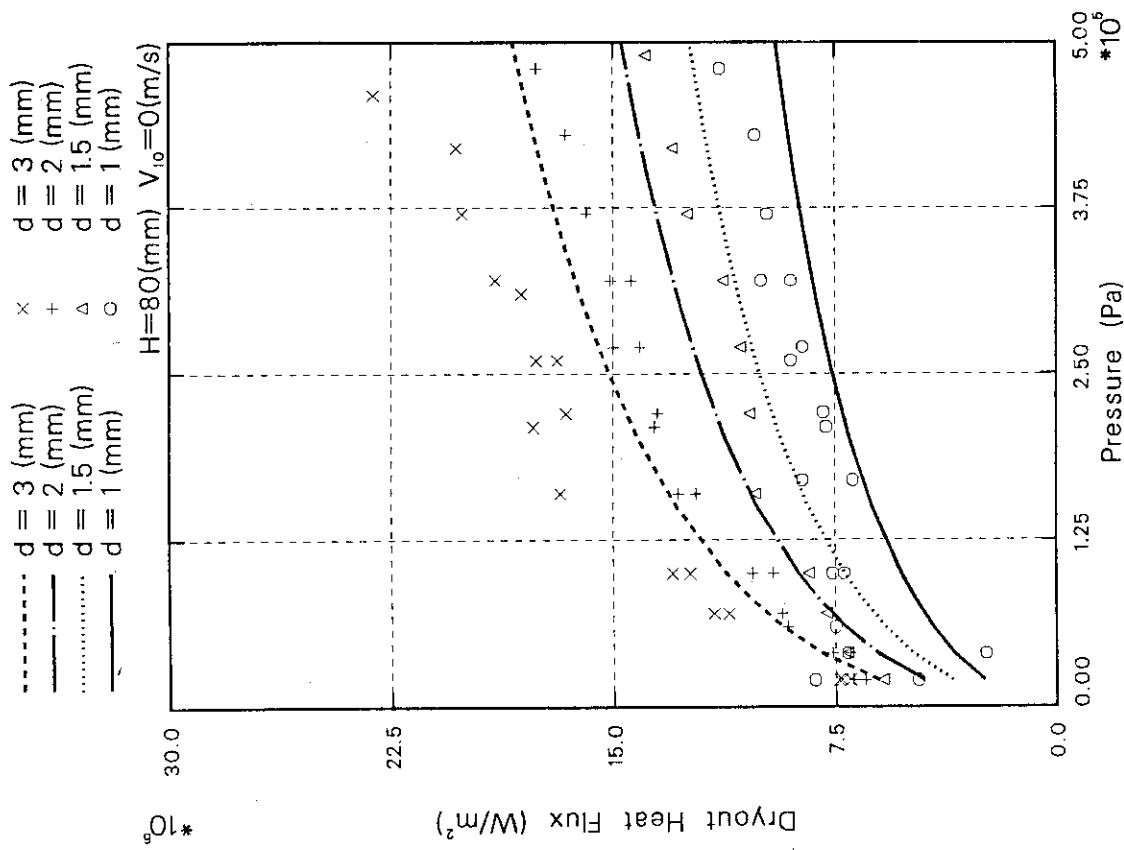


Fig. 4.10 圧力効果

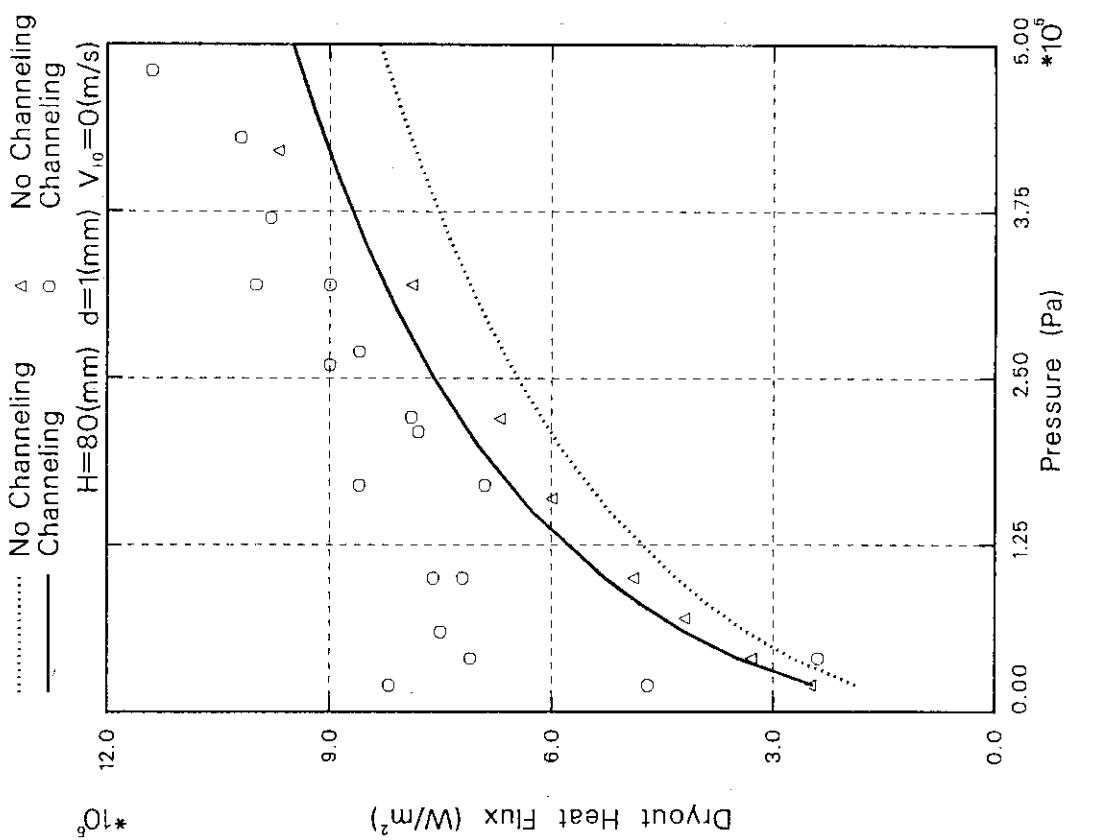
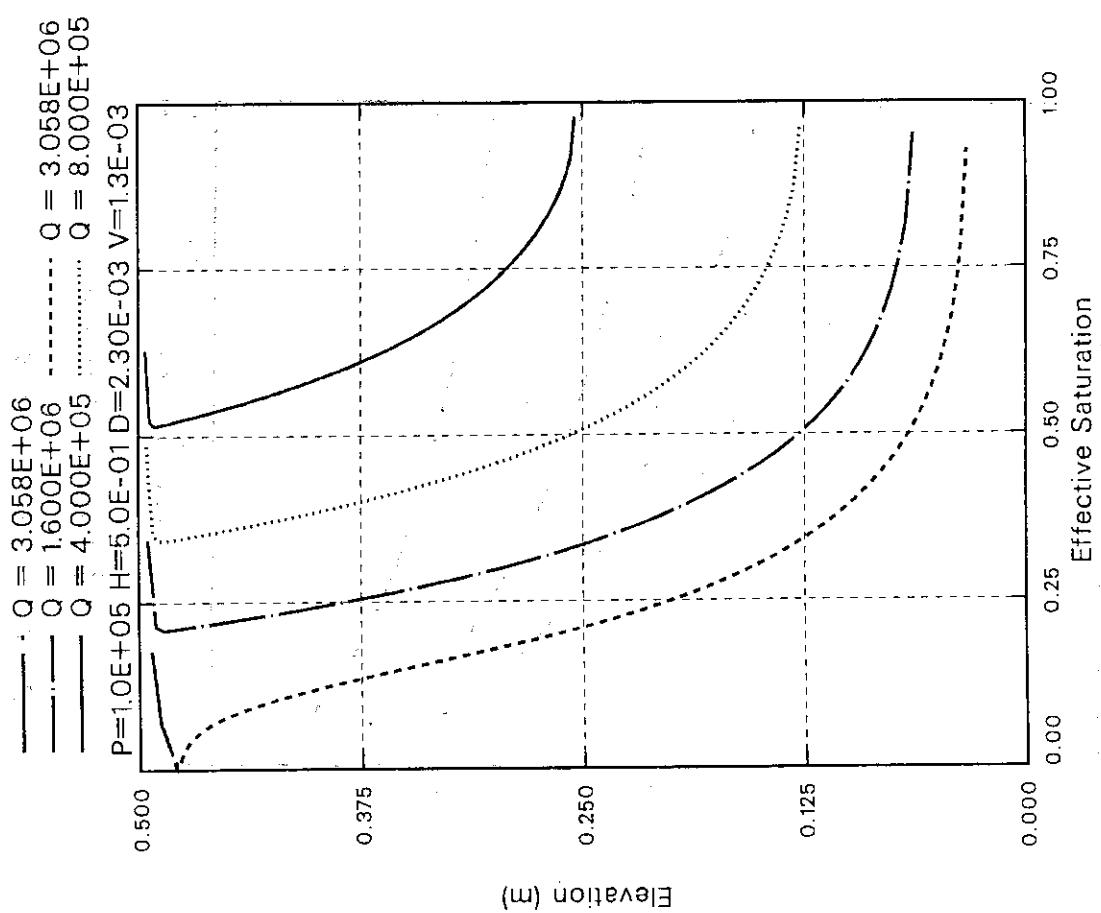
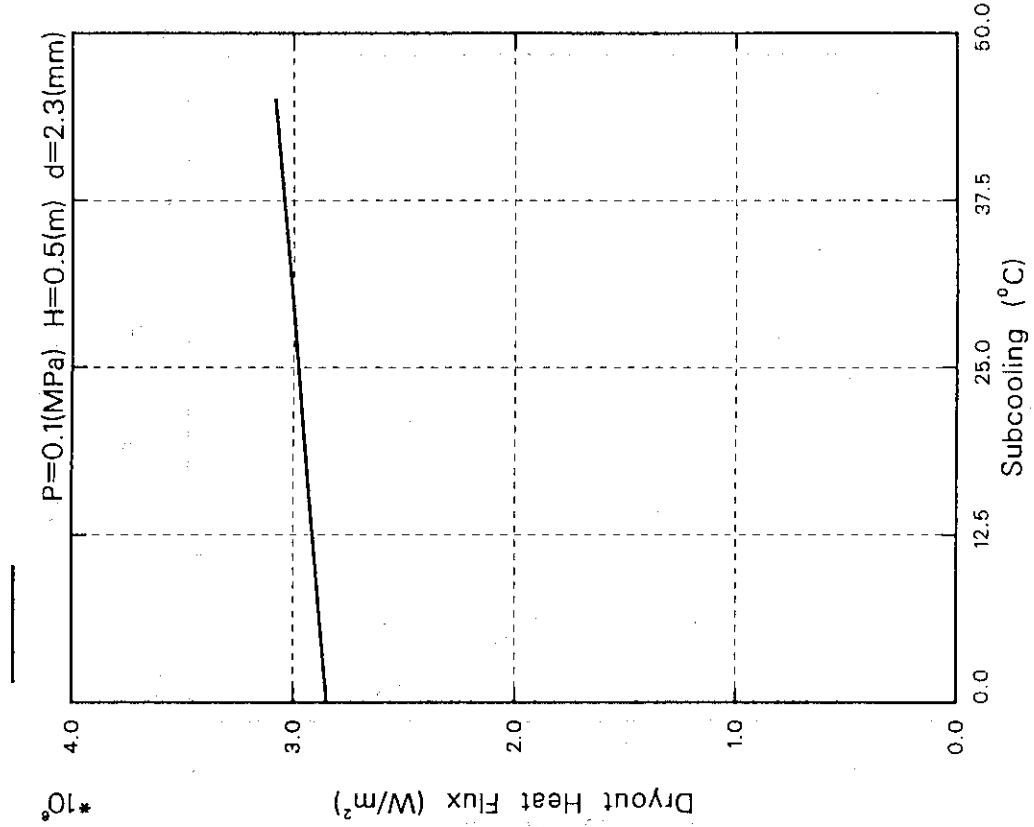


Fig. 4.11 上部境界条件の効果



(a)

Fig. 4.12 サブクール効果



(b)

5. 結 言

- (1) 損傷炉心の冷却性を判定するための基準として重要なデブリベッド中のドライアウト熱流束を予測するための解析プログラムを開発した。本解析プログラムの主要機能及び物理モデルは、1次元相分離モデルを基に気液各相における加速損失、摩擦損失、相間摩擦及び気液間の圧力差を考慮していること、並びに粒子径分布及びデブリベッドの上部におけるチャネリングの有無及びデブリベッド下部におけるサブクール水の流入条件が考慮できることである。
- (2) 本解析モデルにおいて採用したこれら加速損失、摩擦損失、相間摩擦、気液間の圧力差等の物理モデルについては、従来の実験データを用いて評価計算を行い、下記の結論を得た。
- ① ドライアウトに及ぼす加速損失の寄与は小さい。
 - ② 相間摩擦を考慮することによって、予測結果がより安全側に見積られる。
 - ③ 気液間の圧力差については、モデルによる違いが大きくない。
 - ④ 乱流の比透過率については $n = 5$ が実験データに近い。
- (3) 作成した解析プログラムを用いて、デブリベッド中のドライアウト熱流束に及ぼす粒子径、ベッド高、冷却材流量、系圧力、上部境界条件、冷却材サブクール等の効果について調べ、下記の結論を得た。
- ① 粒子径、ベッド高、冷却材注入流量及び系圧力の効果については良く予測できた。
 - ② 粒子径分布のある場合には、過小評価となった。
 - ③ 上部境界が固定されていてチャネリングが生じない場合のドライアウト熱流束の低下については定性的には予測できた。
- (4) 本解析プログラムにより、気液間の抵抗等を考慮したより精度の高い解析ができるとともに、上部境界条件としてチャネリング条件だけでなく上部が固定されたような状況や異なる粒子径の粒子が混合している場合の取り扱いもでき、現状において可能な限り実現象に近い状況での解析ができるようになった。
- (5) 本解析プログラムは単体として使用できるほか、他のシステムコード中のプログラムパッケージとして使用することもできる。更に、単体として使用する場合、気液各相に対する各物理モデルの妥当性を検討するために使用することもできる。その検討の結果、今後の課題として以下の物理モデルについての改良が必要であることが判明した。
- ① 粒径分布効果については、原研において開発した均質混合の場合の取り扱いモデルが、チャネリングが形成されない場合のもので、チャネリングが形成された場合、過小評価となったことから、非加熱実験等による新たなモデル構築が必要と考えられる。
 - ② 気液間の相間摩擦については、現在提唱されているモデルの適用範囲が限られていること、また界面剪断応力を考慮しない場合の予測が危険側の予測となることから、特に粒子径が大きくなったときの適用性に問題があり、今後改良の必要性がある。

謝 詞

本研究の遂行に当たっては、環境安全研究部平野見明部長（前燃料安全工学部長）、燃料安全工学部市川達生部長ならびに辻野毅次長に多くの御援助をいただきました。ここに深く感謝いたします。また、高温工学試験研究炉建設部数土幸夫計画室室長には、研究の当初より多くの御助言、御指導をいただきましたことに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Yutaka, A,Yukio, :"Prekiction of Dryout Heat Flux for Paarticle Bed Simulating Degraded Core in LWR Severe Core Damage Core", Nucl. Sci. Technol. 21(12)(1984)962-964
- (2) Dhir, V. K., Cattin,l. :"Study of Dryout Heat Flux in Beds on Inductively Heated Particles", NUREG-0252(1977)
- (3) Hardee,H.C., Nilson, R.H.:"Natural Convection in Porous Media With Heat Generation", Nucl. Sci. Eng., 63(1977)119-132
- (4) Shires, G. L., Stevens, G.F.:"Dryout during Boiling in Heated Particle Beds", AEEW-R1342, UKAEA,Winfrith(1980)
- (5) Lipinski, R.j.:"A Particle Bed Dryout Model with Upward and Downward Boiling" Trans. Am. Nucl. Soc., 35(1980)358-360
- (6) Lipinski, R.J.: 'A Coolability Model for Postaccident Nuclear Reactor Deburis", Nucl. Technol., 65(1984)53-66
- (7) Schulenberg, T. and Muller, U.:"A Refined Model for the Coolability of Core Debris with Flow Entry from the Bottom", Proc. 5th International Mtg. on Thermal Nucleat Safety, KfK3880, Vol.2(1984)1090-1097
- (8) Ergun, S:"Fluid Flow through Packed Columu", Chem. Eng. Prog., 48(1953)89-94
- (9) Lipinski, R.J.; "A Model for Boiling and Dryout in Particle Beds", NUREG/CR-2646 SAND82-0765(1982)
- (10) Leverett, M. C.:"Capillary Behavior in Porous Solids", Trans. Soc. Min. Eng. AIME,142(1982)806
- (11) Maruyama, Y, Soda, K.:"Dryout Heat Flux in Debris Bed with Different Size Patyicle", Internatinal Symp. on Severe Accidents in Nuclear Power Plant"(1988)

謝 詞

本研究の遂行に当たっては、環境安全研究部平野見明部長（前燃料安全工学部長）、燃料安全工学部市川達生部長ならびに辻野毅次長に多くの御援助をいただきました。ここに深く感謝いたします。また、高温工学試験研究炉建設部数土幸夫計画室室長には、研究の当初より多くの御助言、御指導をいただきましたことに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Yutaka, A,Yukio, :"Prekiction of Dryout Heat Flux for Paarticle Bed Simulating Degraded Core in LWR Severe Core Damage Core", Nucl. Sci. Technol. 21(12)(1984)962-964
- (2) Dhir, V. K., Cattin,l. :"Study of Dryout Heat Flux in Beds on Inductively Heated Particles", NUREG-0252(1977)
- (3) Hardee,H.C., Nilson, R.H.:"Natural Convection in Porous Media With Heat Generation", Nucl. Sci. Eng., 63(1977)119-132
- (4) Shires, G. L., Stevens, G.F.: "Dryout during Boiling in Heated Particle Beds", AEEW-R1342, UKAEA,Winfrith(1980)
- (5) Lipinski, R.j.:"A Particle Bed Dryout Model with Upward and Downward Boiling" Trans. Am. Nucl. Soc., 35(1980)358-360
- (6) Lipinski, R.J.: 'A Coolability Model for Postaccident Nuclear Reactor Deburis", Nucl. Technol., 65(1984)53-66
- (7) Schulenberg, T. and Muller, U.:"A Refined Model for the Coolability of Core Debris with Flow Entry from the Bottom", Proc. 5th International Mtg. on Thermal Nucleat Safety, KfK3880, Vol.2(1984)1090-1097
- (8) Ergun, S:"Fluid Flow through Packed Columu", Chem. Eng. Prog., 48(1953)89-94
- (9) Lipinski, R.J.;"A Model for Boiling and Dryout in Particle Beds", NUREG/CR-2646 SAND82-0765(1982)
- (10) Leverett, M. C.:"Capillary Behavior in Porous Solids", Trans. Soc. Min. Eng. AIME,142(1982)806
- (11) Maruyama, Y, Soda, K.:"Dryout Heat Flux in Debris Bed with Different Size Patyicle", Internatinal Symp. on Severe Accidents in Nuclear Power Plant"(1988)

- (12) 丸山 結, 阿部 豊, 山野憲洋, 早田邦久, "均一粒子から構成されるデブリベッドのドライアウト熱流束及びフラッディング現象", JAERI-M 88-175 (1988)
- (13) Marshsll, J.S. and Dhir, V. K.: "Hydridynamics of counter-current Two Phase Flow through Porous Media", NUREG/CR-3395 (1984)
- (14) Miyazaki, K., et al.: "Dryout Heat Flux for Core Debris Bed (I)", J. Nucl. Sci. Technol., (23)8, (1986) 36-44
- (15) Miyazaki, K., et al.: "Dryout Heat Flux for Core Debris Bed (II)", J. Nucl. Sci. Technol., (23)9, (1986) 769-778
- (16) Dhir, V. K.: "On the Coolability of Degraded LWR Cores", Nucl. Safety, 24(3) (1983) 319-337
- (17) 佐々木貞明, 横見迪朗: "TMI-2号機の現状とその研究成果", 原子力工業, 33(10) (1987) 7-18
- (18) 安濃田 良成ほか; "会話型グラフィック・プロセッサー ROPS 2.0 - ユーザーズ・マニュアル", JAERI-M 88-030 (1988)

付録 A 炉心の損傷形態と損傷炉心の冷却性

1. 炉心の損傷形態

原子炉に事故が生じた場合、燃料体の損傷形態は燃料体が到達した温度によってほぼ決定される。燃料体の挙動と燃料体温度との関係をまとめたものがFig.A.1である。どの時点において冷却水の注入が行われるかによって燃料体の破損形態が異なる。冷却材喪失事故が生じ原子炉がスクラムした後の炉心出力と燃料体温度の履歴の概要を示したものがFig.A.2である。Fig.A.2中の(1)に示すように、燃料体温度が $1,200^{\circ}\text{C}$ を越えないうちに緊急炉心冷却系が作動した場合、事故はいわゆる設計基準事故の範囲内にあり、炉心はほぼ健全のままで事故は収束することになる。もしFig.A.2中の(2)のように、何らかの理由により緊急炉心冷却系が作動しなかったような場合、燃料体温度は上昇を続け炉心溶融に至ることになる。また、Fig.A.2中の(3)に示すように、燃料体温度が $1,200^{\circ}\text{C}$ を越えてから緊急炉心冷却系が作動した場合には、酸化が進んで脆くなったり、溶融したりしている燃料体に低温の冷却水が注入されるため燃料体は粒子状に破碎し、いわゆるデブリベッドとなって堆積する。このデブリベッドは仮に一旦冷却されたとしても、デブリベッドの状態や冷却水の状態によっては、再溶融する可能性がある。

損傷した炉心が形成するデブリベッドの堆積形態についても、Fig.A.3で示すように、いくつかの状況が想定される⁽¹⁶⁾。Fig.A.3(a)は炉心部において形成されたデブリベッドに対して、炉心下部からの注水が期待できる場合、Fig.A.3(b)は炉心部において形成されたデブリベッドが炉心下部での流路閉塞によって炉心下部からの注水が期待できずほぼ静水状態での冷却となっている場合、Fig.A.3(c)は圧力容器下部に堆積したデブリベッドに対して想定される冷却モードでFig.A.3(b)と同様上部からの冷却のみ期待でき基本的には静水状態と同じ状況となった場合である。

1979年に米国で発生したTMI-2事故では、炉心内の冷却水の喪失により炉心が露出し残留崩壊熱により燃料体の一部溶融が生じた。非常用炉心冷却系の作動により、炉心は一旦は冷却されたが、機器の故障と運転員の誤操作により燃料体は再溶融し下部プレナムに流れ落ちた。Fig.A.4にTMI-2の最終炉心形状を示す⁽¹⁷⁾。炉心部には溶融固化したデブリベッド及び高温燃料の急激な冷却により崩れ落ちたデブリベッドが形成され、圧力容器下部プレナムには炉心部から流れ落ちた溶融物が固化したデブリベッドが形成された。

2. 損傷炉心の冷却性

TMI-2事故においては、幸いにして形成されたデブリベッドの冷却は保持され、事故は圧力容器内で収束した。しかし、万が一冷却が保持されなかつならばデブリベッドは再溶融し、圧力容器の貫通、最悪の場合は環境への事故の拡大という事態を招いた可能性がある。

一方、TMI-2事故からも明らかなように、万が一炉心が損傷するような事故が起こったとしても、安定に長期間冷却することが可能であるならば、事故の拡大を圧力容器内に止めることができる。したがって、損傷した炉心の冷却性を評価するため、炉心損傷事故（シビアアクシデント）により形成される可能性のある様々な形状のデブリベッドについて冷却性を評価することが重要となる。

形成されたデブリベッドの長期冷却可能性は、デブリベッド内において再びドライアウトが生じるかどうかを判定することで達成される。ドライアウトとは、デブリベッド中の局所的な水流量がデブリベッドから発生する残留崩壊熱を除去するのに十分でなくなった時に、その部分が冷却のなされないドライな空間となる現象である。

原研においては、1984年より損傷炉心冷却実験装置を用いてデブリベッドの冷却限界を定量的に評価するための実験を行うとともに、デブリベッドの冷却性を評価するための解析手法の開発を開始した。また、炉心損傷事故の事故進展評価解析並びに事故管理評価に資するため、デブリベッドの冷却可能限界に関する実験データを収集しデータベース化した。

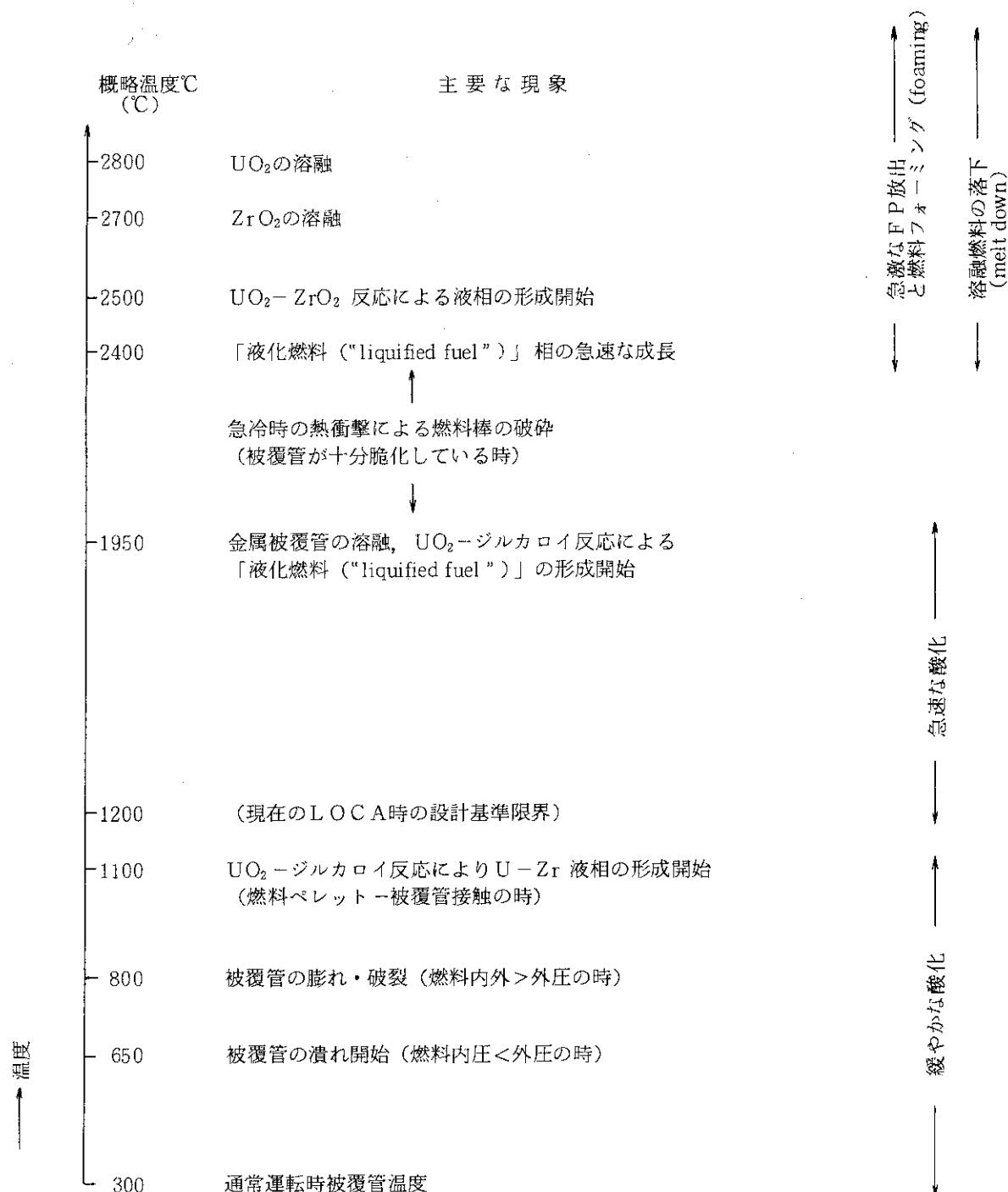


Fig. A.1 燃料体温度と損傷との関係

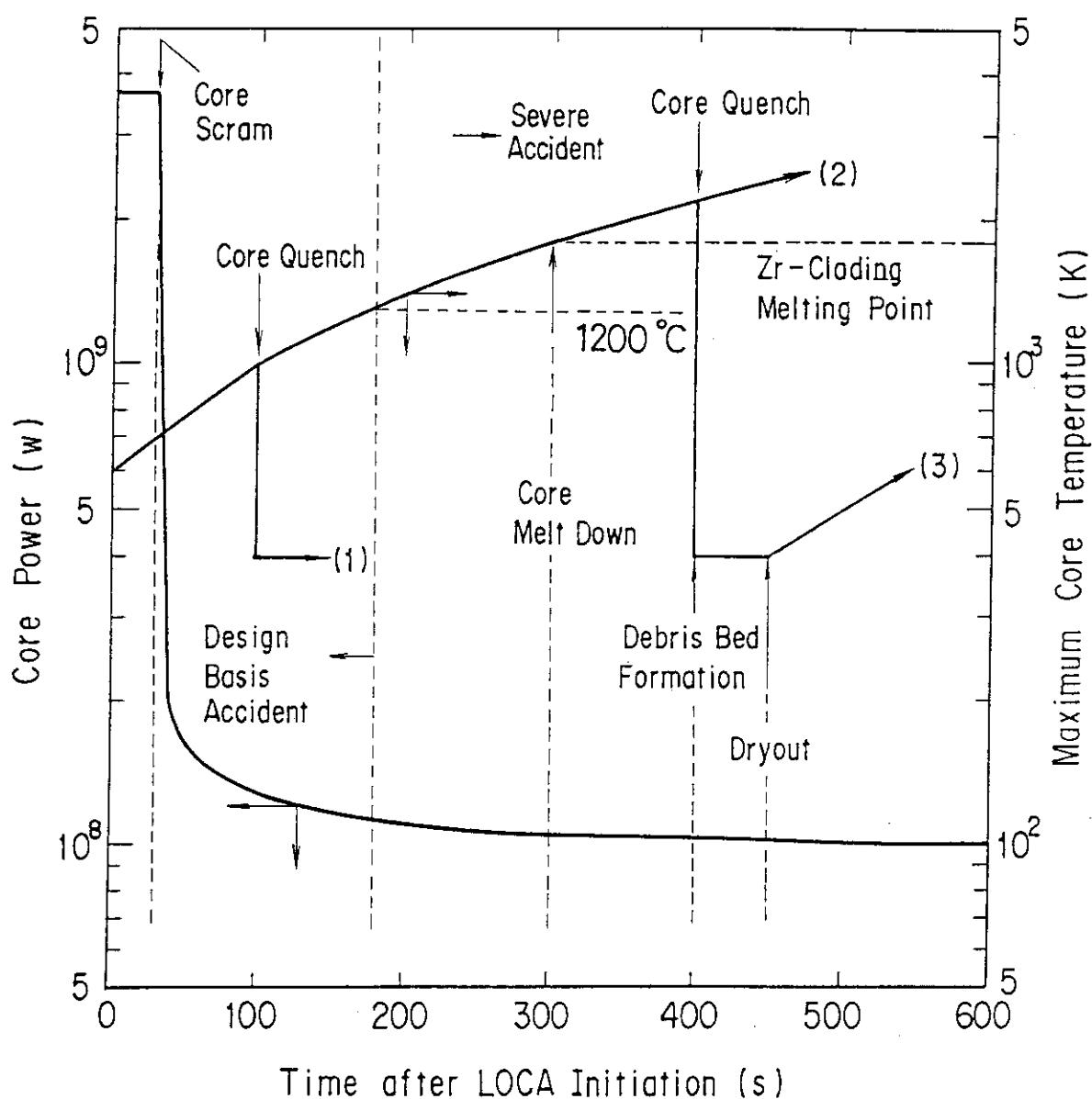


Fig. A.2 冷却材喪失事故時の燃料体温度履歴の概要

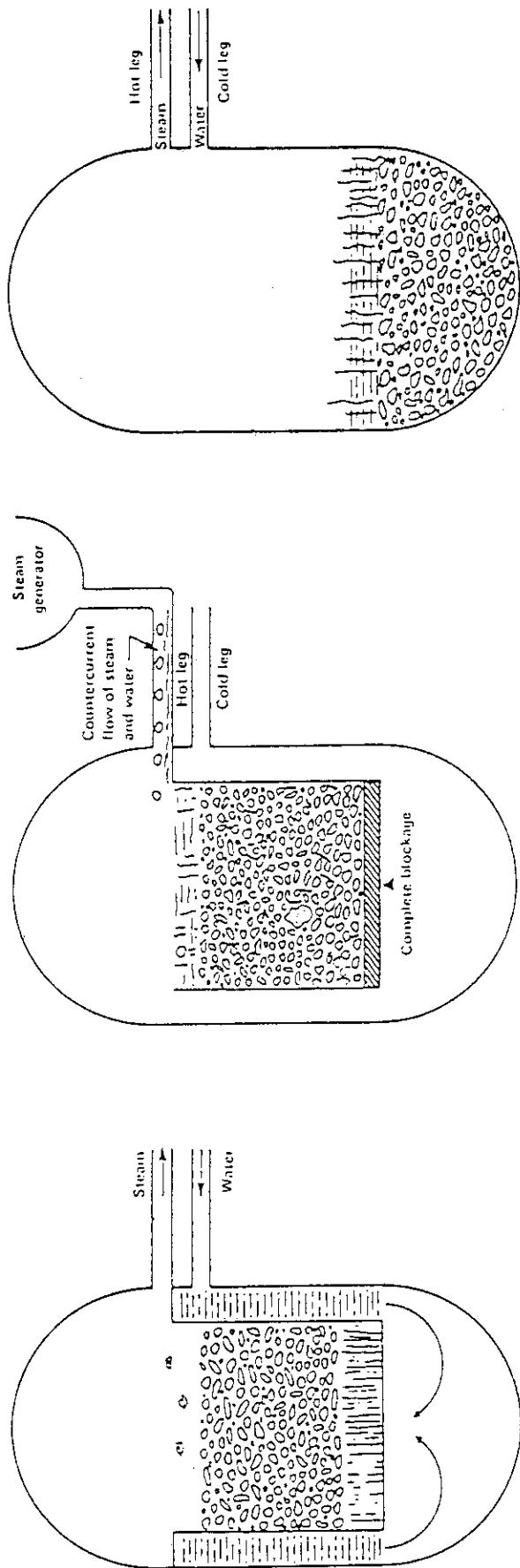


Fig.A.3 想定されるデブリベッドの堆積形態

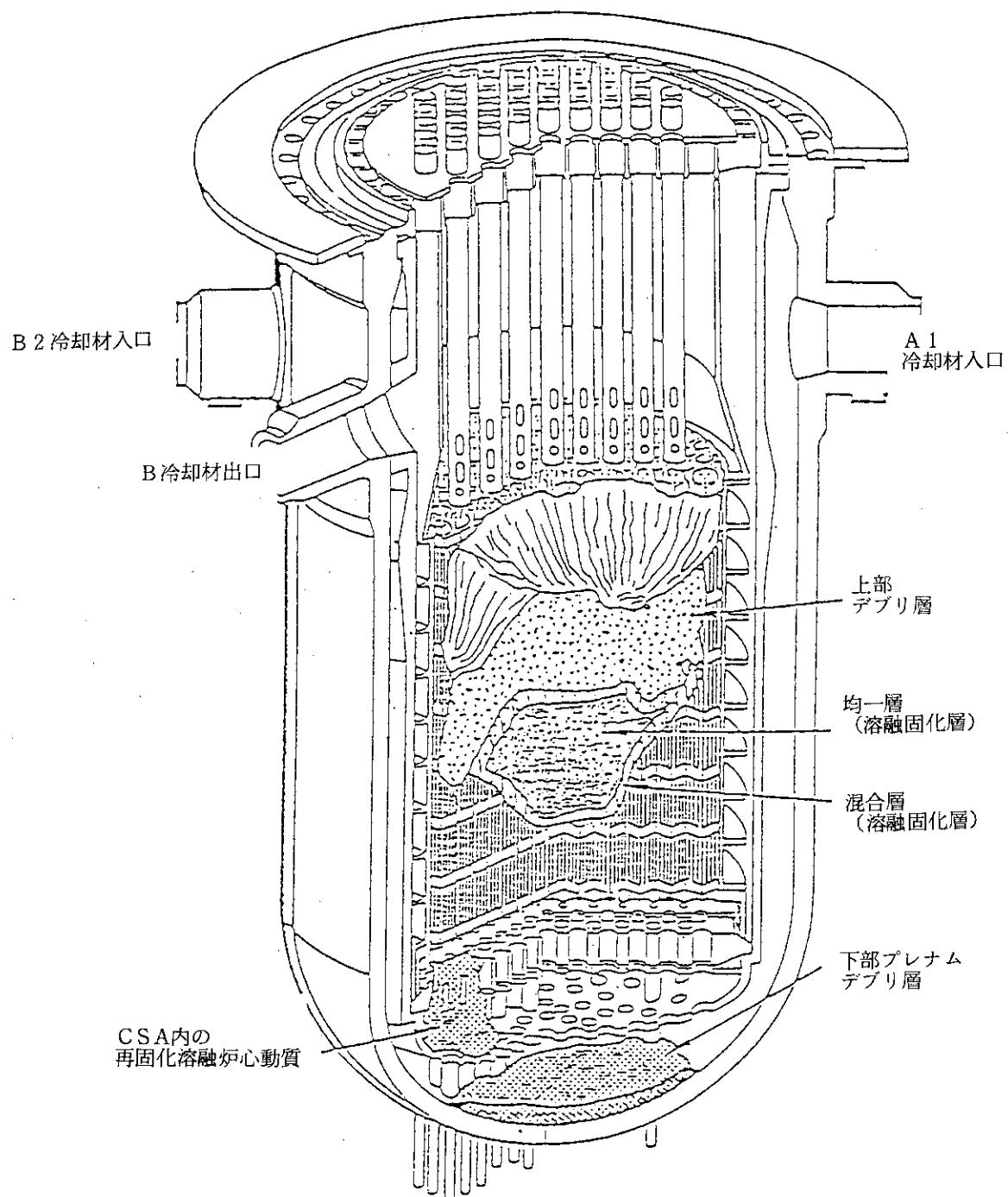


Fig.A.4 TMI - 2 の炉心最終形状

付録 B プログラムの使用方法

1. 全体構成

本システムは次の5つのシステムから構成されている。

- ① 損傷炉心冷却挙動解析プログラム (STEADY)
- ② 損傷炉心冷却挙動実験データベース (DRYOUT)
- ③ パソコン通信プログラム (K-term)
- ④ 作図データ変換プログラム (STROIN)
- ⑤ グラフィックプロセッサ (ROPS 2.0)⁽¹⁸⁾

③と⑤は既存のシステムであり、①と②と④は本システムのために作成または整備されたものである。システムの全体構成をFig.B.1に示す。

本システムにおける解析パターンとしては、次の2通りのものがある。

(1) ドライアウト解析

ある1つのデブリベッドの条件に対して、ドライアウトに至るまでの解析を行う。ドライアウトの検出は、Fig.B.2に示すように、デブリベッド内の水率sの高さ方向の変化を計算し、ある高さにおいて水率sが0となる時の熱流束をドライアウト熱流束として求める。解析プログラム内でドライアウトが検出された後は、プログラムに内蔵してある作図データ作成ルーチンが起動し、直接グラフィックプロセッサにつながり、Fig.B.3のような図を作ることができる。Fig.B.3には、各熱出力における最小の水率sの高さ位置も併せて示してある。

(2) パラメータ解析

複数の条件に対して、パラメトリックに計算を行い、そのパラメータに対してドライアウト熱流束を計算するためのもので、Fig.B.4のような出力をを行う。この解析では、解析プログラムと実験データベースの両方またはどちらか一方のデータを作図データ変換プログラムに通じて、グラフィックプロセッサにつなぐことにより作図することができる。この図で示される実験データライブラリーとは実験データベースよりパソコン通信プログラムを通して作られるものである。

2. 入力データの作成方法

解析プログラム用入力データはデータセット J 3733. COOL. STEADY. DATAに収められている。入力データのサンプルをFig.B.5に示す。以下に入力データについて説明する。

この入力パラメータ解析を行うためのもので、ドライアウト解析を行うためには、以下に述べる入力データにおいてCからJのデータは最小値=最大値とした1組だけを入力する。

A. 粒径の層状分布

ベッドの下の層から層の数だけ入力する。粒子が層状分布を持たないときは1組だけ入力す

るか、または全く入力しない。このデータを入力したときはC, E, Gの入力は行わない。

A - 1 free format 粒径 d (m)

A - 2 free format 層の高さ hi (m)

B. エンドカード

層状分布の入力の終わりを意味し、"E"を入力する。

B - 1 A 1

C. 粒径の均質混合

Aの入力をしたときは入力しない。

C - 1 free format 均質混合における標準偏差 σ_g

D. 圧力 P (Pa)

D - 1 free format 最小値

D - 2 free format 最大値

D - 3 free format 増分 (最小値 ≠ 最大値のとき)

E. ベッド高 h (m)

Aの入力をしたときは入力しない。

D - 1 free format 最小値

D - 2 free format 最大値

D - 3 free format 増分 (最小値 ≠ 最大値のとき)

F. ベッド上の水位 h_w (m)

F - 1 free format 最小値

F - 2 free format 最大値

F - 3 free format 増分 (最小値 ≠ 最大値のとき)

G. 粒径 d (m)

Aの入力をしたときは入力しない。

G - 1 free format 最小値

G - 2 free format 最大値

G - 3 free format 増分 (最小値 ≠ 最大値のとき)

H. 冷却水の流量 V_{10} (m/s)

H - 1 free format 最小値

H - 2 free format 最大値

H - 3 free format 増分 (最小値 ≠ 最大値のとき)

I. 冷却水の温度 T_c (°C)

V_{10} の最大値 > 0 のときに入力する。サブクールを考慮しないときは飽和温度より大きい値を入力する。

I - 1 free format 最小値

I - 2 free format 最大値

I - 3 free format 増分 (最小値 ≠ 最大値のとき)

J. エンドカード

次の計算を行うときは、このカードには何も入力しないで、1行プランクをあける。そして、次のカードからC～Jの入力を繰り返す。計算を終了させるときは”E”を入力する。

J - 1 A 1

3. 計算の実行方法

この2つの解析パターンにおける実行JCLは、J3733.COOL.JCL.CNTLに格納されており、実行JCLのメンバ名は以下の通りである。ドライアウト解析及びパラメータ解析についてのサンプルJCLをFig.B.6及びFig.B.7に示す。

DRYOUT1	.....	ドライアウト解析
PARAMET1	.....	パラメータ解析 (STEADY→STROIN→ROPS)
PARAMET2	.....	パラメータ解析 (STEADY)
PARAMET3	.....	パラメータ解析 (STROI→ROPS)
PARAMET4	.....	パラメータ解析 (ROPS)

これらのJCLで使用されているデータセットは以下の通りである。

COOL. ROPSCCOMM. DATA	.....	ROPSコマンドファイル
COOL. ROPS PLOT. DATA	.....	ROPSプロッターファイル
COOL. SRI INPUT. DATA	.....	作図データ変換プログラムの入力データファイル
COOL. SRI PLOTS. DATA	.....	解析プログラムからのプロットデータファイル
COOL. SRI PLOTE. DATA	.....	実験データベースからのプロットデータファイル
COOL. STEADY. DATA	.....	解析プログラムの入力データファイル
COOL. STEADY. LOAD	.....	解析プログラムのロードモジュール
COOL. STROIN. LOAD	.....	作図データ変換プログラムのロードモジュール
COOL. EXPLIB. DATA	.....	実験データライブラリ

4. 作図方法

4.1 作図プログラムの概要

解析プログラムで計算されたデータや実験データベースから転送されたデータを、作図データ変換プログラムを通してROPSにつなぎ、作図を行うことができる。ROPSを使って作図を行うためには、次の2つのことが必要である。

- ① これらのデータの中から必要なデータを選び出す。
- ② どのようなグラフを作るかという指示を与える。

この①と②の情報が収められているデータがそれぞれコマンドデータファイルとプロッターファイルである。作図データ変換プログラムではこれらのファイルの作成を行っている。このプログラムのロードモジュール作成にあたっては、Fig.B.8に示すソースプログラムにおける”J3733”をプロッターファイルを格納するセッションのIDに変更しておく必要がある。

Fig.B.9 にロードモジュール作成用の J C L を示す。

4.2 作図プログラム用入力データ

作図データ変換プログラムでは、どのデータを横軸に取るかによって指定するパラメーター及び条件が決まっている。その内容を Table B.1 に示す。この表で示されたものは必ずパラメーター及び条件として指定された順番で入力しなければならない。

また、文字型の入力データについては、R O P S の指示文字を用いて特殊文字を出力することができます。この指示文字について Table B.2 に示す。

作図データ変換プログラム用入力データはデータセット J 3733. COOL. SRI INPUT. DATA に収められており、そのサンプルを Fig.B.10 に示す。入力データの説明を以下に述べる。

A. 出力先の番号

A - 1 free format = 1 : T 4014
= 2 : N L P

B. 図の下部タイトル (R O P S のコマンド T I T L E に対応するデータ)

B - 1 A 40

C. 図の上部タイトル (R O P S のコマンド T L A B E L 2 に対応するデータ)

C - 1 A 40

D. 座標軸及びパラメーターの番号

D - 1 free format 横軸の番号
= 1 : 圧力 (Pa)
= 2 : ベッド高 (m)
= 3 : ベッド上の水位 (m)
= 4 : サブクール領域の高さ (m)
= 5 : 粒径 (m)
= 6 : ポロシティー^{*}
= 7 : 流量 (m/s)
= 8 : サブクーリング (°C)
= 9 : レイノルズ数

D - 2 free format 縦軸の番号
= 10 : ドライアウト熱流束 (W/m²)
= 11 : ドライアウトが生じる高さ (m)
= 12 : トータルの圧力損失 (Pa)
= 13 : 二相領域の圧力損失 (Pa)

D - 3 free format パラメーターの番号
= 0 : パラメーターを指定しない
以下横軸の番号と同じ

E. 条件

横軸の番号の小さい条件から順に条件の数だけ入力する。

E - 1 free format 条件 1

E - 2 free format 条件 2

E - 3 free format 条件 3

E - 4 free format 条件 4

F. プロットデータファイルの数（パラメーターの番号 = 0 のとき）

F - 1 free format

G. ファイルデータ

パラメーターの番号 = 0 のときファイルの数だけ入力する

G - 1 A 20 ファイルに対する説明

G - 2 free format 作図の指定

= 1 : 線

= 2 : 記号

H. パラメーターの数（パラメーターの番号 ≠ 0 のとき）

H - 1 free format

I. パラメーターデータ

パラメーターの番号 ≠ 0 のときパラメーターの数だけ入力する

K - 1 free format パラメーター

K - 2 A 20 パラメーターに対する説明

5. 出力方法

本解析プログラムの出力には標準出力と詳細出力の 2 種類があり、それぞれのサンプル出力を Table B.3 から Table B.4 に示す。標準出力は入力データと計算結果のみを出力するもので、大量の計算結果を出力するときに適している。一方、詳細出力はこれに加えてドライアウトに至るまでの熱流束や水率の変化なども出力する。

この 2 つの出力を行うために 2 種類のロードモジュールを用意した。標準出力用のロードモジュールはソースプログラムのコンパイル時にアスタ行を無効としたもので、詳細出力用のロードモジュールはそのアスタ行を有効としたものである。これらのロードモジュールを作成するにあたって、Fig.B.11 に示すソースプログラムにおける I P F N の "J 3733" のところに、R O P S⁽¹¹⁾ のプロッターファイルを格納するセッションの I D を変更しておく必要がある。Fig.B.12 にロードモジュール作成のための J C L を示す。メンバ名 STANDARD, DETAIL がそれぞれ標準アウトプットと詳細アウトプットのロードモジュールに対応している。解析プログラムの実行 J C L でこれらのメンバの内のどちらかを指定することによって、おのおの出力を行うことができる。

Table B.1 パラメータ・条件の指定

		パラメータまたは条件 先←入力順序→後			
横軸	縦軸	圧力	ベッド高	ベッド上の水位	粒子径
サブクール領域の高さ		●	●	●	●
粒子径		●	●	●	●
ボロシティ		●	●	●	●
流量		●	●	●	●
サブクール		●	●	●	●
レイノルズ数					●

Table B.2 タイトル等に特殊文字を出力する書式

指示文字	アルファベット
>	S T A N D A R D (大文字)
#	G R E E K (ギリシャ文字)
!	M A T H E M A T I C (数学記号)
?	? + : 上つき, ? - : 下つき
%	% * : 上つき、下つき文字の終了
<	小文字

*) ROPSのシステムでは、上付き、下付きに終了のデフォルトは「」(シングルコーテーション)であるが、本プログラムでは、ソースプログラムのFORMAT文の中に「」をいれるのを避けるため「%」とした。

Table B.3 標準出力

PRESSURE (PA)	BED HEIGHT (M)	WATER LEVEL ON THE BED (M)	HIGHT OF SUBCOOL ZONE (M)	PARTICLE DIAMETER (M)	POROSITY	COOLANT VELOCITY (M/S)	SUBCOOL TEMP. (DEG-C)	REYNOLDS NUMBER	DRYOUT HEAT FLUX (W/M ²)	DRYOUT HEIGHT (M)	OVER ALL PRESSURE DROP (PA)	PRESSURE DROP IN PACKED 2P (PA)
2.000E+04	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	1.501E-01	4.128E+03	3.699E-05	1.778E+03	7.431E+02
4.000E+04	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	2.811E-01	6.007E+03	3.041E-05	1.636E+03	6.831E+02
6.000E+04	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	4.023E-01	7.417E+03	1.467E-04	1.553E+03	6.481E+02
8.000E+04	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	5.189E-01	8.613E+03	1.563E-05	1.493E+03	6.226E+02
1.000E+05	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	6.326E-01	9.675E+03	7.880E-05	1.445E+03	6.024E+02
1.500E+05	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	9.024E-01	1.188E+04	4.005E-05	1.357E+03	5.659E+02
2.000E+05	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	1.155E+00	1.365E+04	3.242E-05	1.294E+03	5.404E+02
2.500E+05	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	1.394E+00	1.514E+04	8.225E-06	1.245E+03	5.209E+02
3.000E+05	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	1.623E+00	1.643E+04	4.119E-05	1.205E+03	5.091E+02
3.500E+05	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	1.842E+00	1.757E+04	4.977E-05	1.171E+03	4.918E+02
4.000E+05	8.000E-02	0.0	0.0	5.900E-04	4.000E-01	0.0	0.0	2.053E+00	1.859E+04	6.670E-05	1.141E+03	4.804E+02

Table B.4 詳細抽出力

*	P = 1.000E+05	H = 5.000E-01	WL = 0.0	D = 2.300E-03	VLO = 1.260E-03	TC = 6.000E+01	*
TS	= 3.732E+02	HLV = 2.259E+06	RV = 5.909E-01	SIGMA = 6.012E-03	RL = 9.587E+02		
XMW	= 1.254E-05	XMUL = 2.708E-04					
HS	= 2.541E-01	H-HC-HS = 2.421E-01	HCN = 7.463E-03	HSN = 5.083E-01	1-HCN-HSN = 4.843E-01		
Q = 8.000E+05	QH = 4.000E+05						
HC = 3.732E-03	HS = 2.541E-01	H-HC-HS = 2.421E-01	AA = 0	BB = 0	CC = 0	DD = 0	EE = FF = GR/PC/(DGR/DS)
1 0 4.963E-01	6.285E-01	2.681E+02	2.300E-03	-5.182E-02	-1.398E+04	-6.257E+03	9.390E+03 -2.183E+04 3.102E-05 -8.203E-03
5000 4.721E-01	5.264E-01	6.769E-01	2.300E-03	-4.669E-02	-3.127E+03	-2.420E+03	9.390E+03 -3.735E+03 3.390E-05 -6.288E-03
10000 4.478E-01	5.436E-01	7.510E-01	2.300E-03	-4.155E-02	-2.994E+03	-2.434E+03	9.390E+03 -3.848E+03 3.336E-05 -6.598E-03
15000 4.236E-01	5.628E-01	8.475E-01	2.300E-03	-3.644E-02	-2.863E+03	-2.455E+03	9.390E+03 -3.949E+03 3.278E-05 -6.951E-03
20000 3.994E-01	5.846E-01	9.702E-01	2.300E-03	-3.127E-02	-2.739E+03	-2.487E+03	9.390E+03 -4.032E+03 3.217E-05 -7.359E-03
25000 3.752E-01	6.099E-01	1.134E+00	2.300E-03	-2.616E-02	-2.623E+03	-2.537E+03	9.390E+03 -4.084E+03 3.149E-05 -7.841E-03
30000 3.510E-01	6.399E-01	1.368E+00	2.300E-03	-2.526E-02	-2.526E+03	-2.619E+03	9.390E+03 -4.106E+03 3.075E-05 -8.427E-03
35000 3.268E-01	6.768E-01	1.720E+00	2.300E-03	-1.589E-02	-2.462E+03	-2.761E+03	9.390E+03 -3.979E+03 2.990E-05 -9.167E-03
40000 3.026E-01	7.248E-01	2.316E+00	2.300E-03	-1.072E-02	-2.468E+03	-3.033E+03	9.390E+03 -3.61E+03 2.889E-05 -1.016E-02
45000 2.783E-01	7.938E-01	3.588E+00	2.300E-03	-5.858E-03	-2.6355E+03	-3.671E+03	9.390E+03 -2.776E+03 2.761E-05 -1.164E-02
50000 2.541E-01	9.782E-01	1.412E+02	2.300E-03	-4.47E-04	-6.638E+00	-5.220E+02	9.390E+03 -2.747E+00 2.488E-05 -1.591E-02
Q = 1.600E+06	QH = 8.000E+05						
HC = 4.247E-03	HS = 1.271E-01	H-HC-HS = 3.687E-03	HCN = 8.493E-03	HSN = 2.541E-01	1-HCN-HSN = 7.374E-01		
1 0 4.958E-01	4.852E-01	2.522E+02	2.300E-03	-3.138E-01	-2.530E+04	-7.003E+03	9.390E+03 -2.245E+04 3.531E-05 -5.565E-03
5000 4.589E-01	3.542E-01	4.852E-01	2.300E-03	-2.822E-01	-5.251E+03	-2.257E+03	9.390E+03 -1.741E+03 4.132E-05 -3.471E-03
10000 4.220E-01	3.731E-01	5.428E-01	2.300E-03	-2.512E-01	-4.957E+03	-2.297E+03	9.390E+03 -1.991E+03 4.027E-05 -3.752E-03
15000 3.851E-01	3.943E-01	6.152E-01	2.300E-03	-2.199E-01	-4.634E+03	-2.329E+03	9.390E+03 -2.154E+03 3.917E-05 -4.076E-03
20000 3.483E-01	4.185E-01	7.089E-01	2.300E-03	-1.888E-01	-4.288E+03	-2.353E+03	9.390E+03 -2.590E+03 3.802E-05 -4.457E-03
25000 3.114E-01	4.467E-01	8.358E-01	2.300E-03	-1.574E-01	-3.957E+03	-2.369E+03	9.390E+03 -2.936E+03 3.680E-05 -4.916E-03
30000 2.745E-01	4.807E-01	1.023E+00	2.300E-03	-1.263E-01	-3.519E-03	-2.381E+03	9.390E+03 -3.303E+03 3.548E-05 -5.486E-03
35000 2.377E-01	5.233E-01	1.326E+00	2.300E-03	-9.477E-02	-3.110E+03	-2.401E+03	9.390E+03 -3.666E+03 3.400E-05 -6.233E-03
40000 2.006E-01	5.814E-01	1.902E+00	2.300E-03	-6.38E-02	-2.710E+03	-2.466E+03	9.390E+03 -3.958E+03 3.226E-05 -7.299E-03
45000 1.633E-01	6.735E-01	3.380E+00	2.300E-03	-3.210E-02	-2.407E+03	-2.711E+03	9.390E+03 -3.900E+03 2.997E-05 -9.099E-03
50000 1.271E-01	9.668E-01	1.392E+02	2.300E-03	-8.989E-04	-4.856E+00	-4.981E+02	9.390E+03 -2.044E+00 2.501E-05 -1.565E-03
Q = 3.200E+06	QH = 1.600E+06						
HC = 5.044E-03	HS = 6.353E-02	H-HC-HS = 4.314E-01	HCN = 1.009E-02	HSN = 1.271E-01	1-HCN-HSN = 8.628E-01		
1 0 4.950E-01	3.439E-01	1.0225E+02	2.300E-03	-1.466E+00	-4.105E+04	-7.663E+03	9.390E+03 -9.105E+03 4.194E-05 -3.321E-03
5000 4.518E-01	2.209E-01	3.886E-01	2.300E-03	-1.320E+00	-7.433E+03	-1.361E+03	9.390E+03 -3.861E+02 5.233E-05 -1.799E-03
10000 4.087E-01	2.365E-01	4.374E-01	2.300E-03	-1.027E+00	-6.728E+03	-1.277E+03	9.390E+03 -5.032E+02 4.834E-05 -2.161E-03
15000 3.655E-01	2.595E-01	5.085E-01	2.300E-03	-7.027E+00	-5.906E+03	-1.932E+03	9.390E+03 -8.188E+02 4.626E-05 -2.774E-03
20000 3.224E-01	2.827E-01	6.041E-01	2.300E-03	-3.806E-01	-6.333E+03	-1.932E+03	9.390E+03 -1.354E+03 4.408E-05 -2.860E-03
25000 2.792E-01	3.113E-01	7.541E-01	2.300E-03	-2.741E-01	-5.849E+03	-2.027E+03	9.390E+03 -1.254E+03 4.176E-05 -3.364E-03

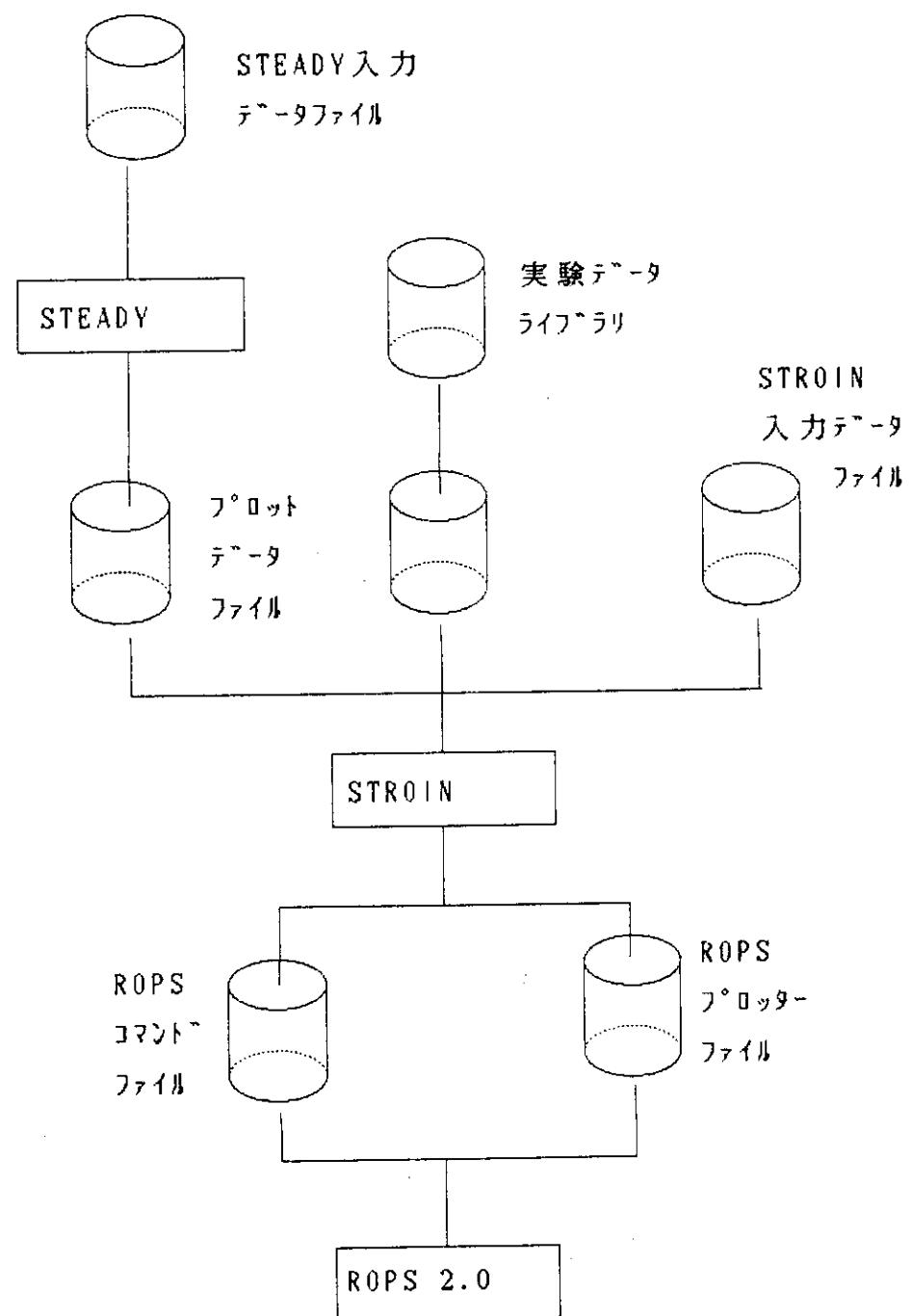


Fig.B.1 計算ツスメムの全体構成

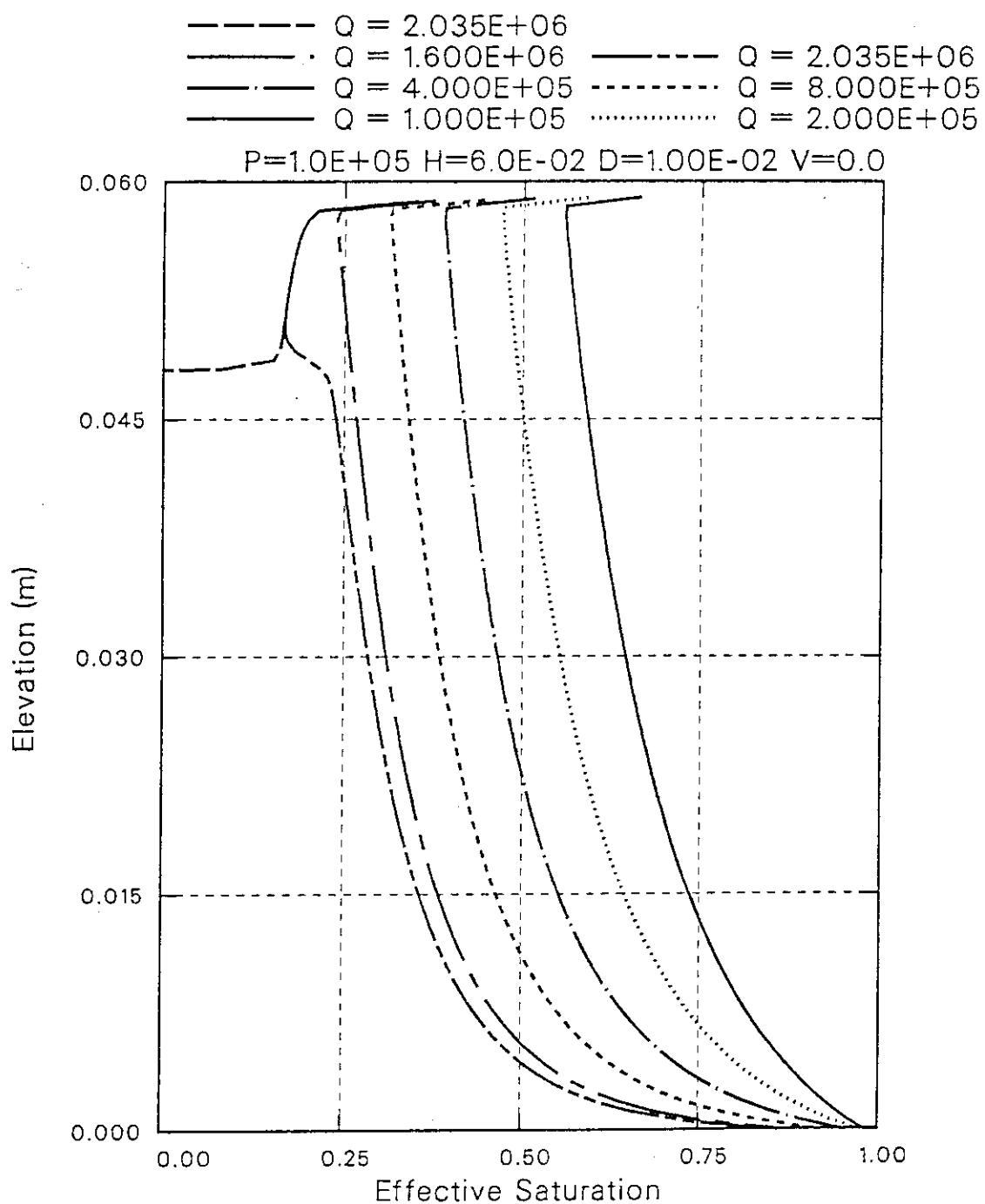


Fig. B.2 ドライアウト計算結果例

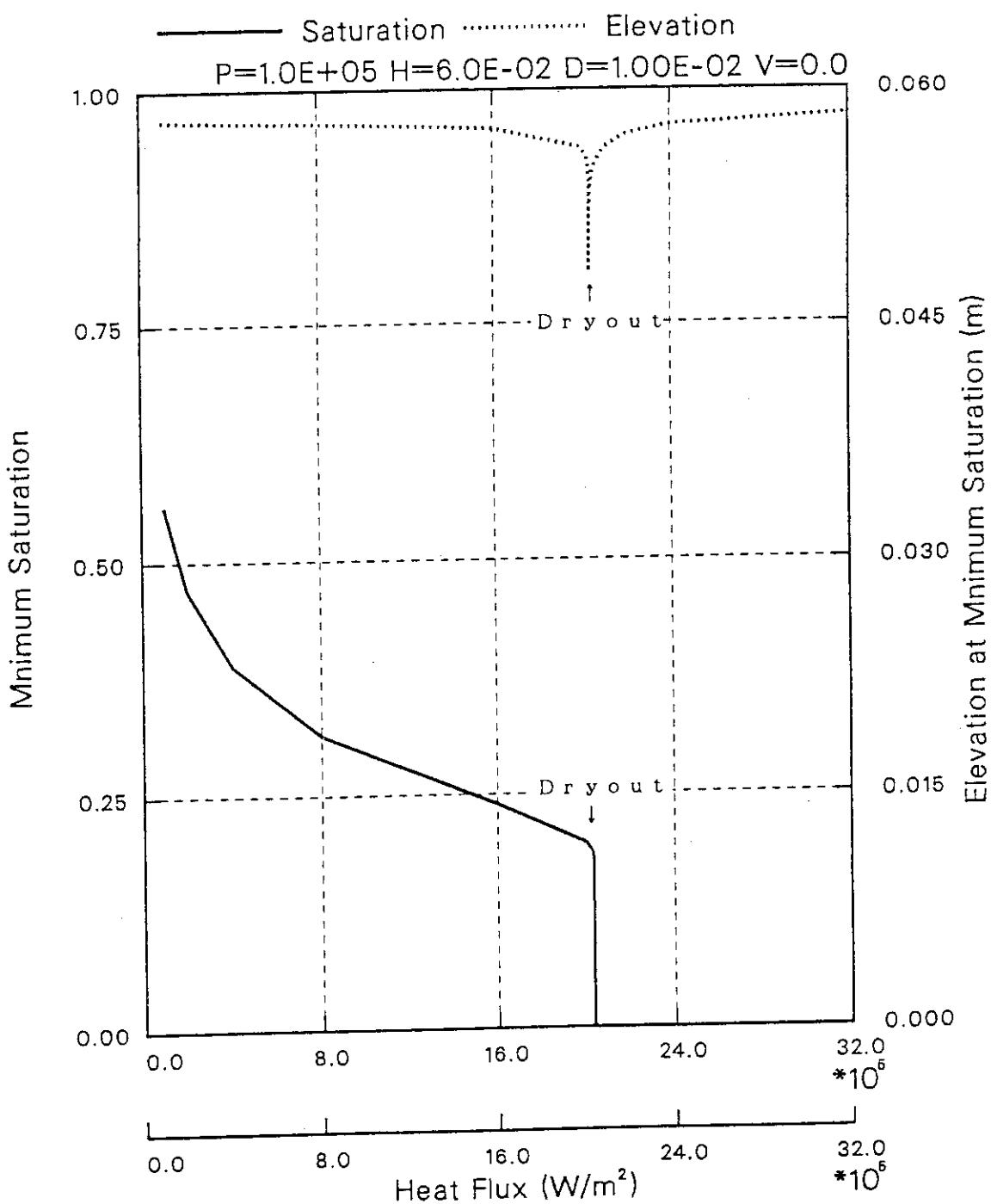


Fig.B.3 最小水率と最小水率の高さ

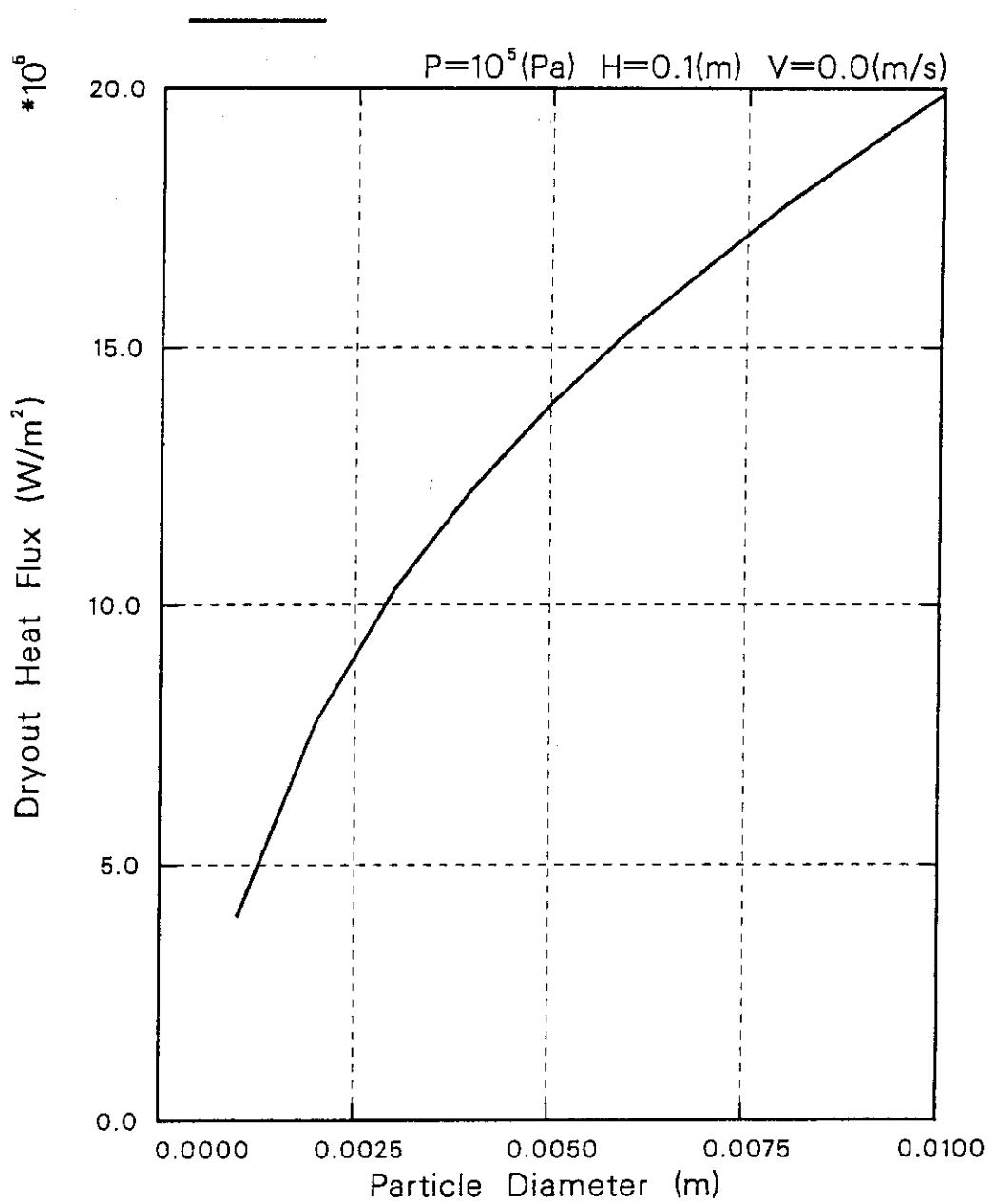


Fig. B.4 パラメータ計算結果例

E	B-1	END OF THE STRATIFICATION	
0.0	C-1	STANDARD DEVIATION OF HOMOGENEOUS MIXING	
0.2E+05	D-1	MINIMUM OF PRESSURE	(PA)
1.0E+05	D-2	MAXIMUM OF PRESSURE	(PA)
0.2E+05	D-3	INCREMENT OF PARTICLE DIAMETER	(M)
0.08	E-1	MINIMUM OF BED HEIGHT	(M)
0.08	E-2	MAXIMUM OF BED HEIGHT	(M)
0.0	F-1	MINIMUM OF WATER LEVEL ON THE BED	(M)
0.0	F-2	MAXIMUM OF WATER LEVEL ON THE BED	(M)
1.5E-03	G-1	MINIMUM OF PARTICLE DIAMETER	(M)
1.5E-03	G-2	MAXIMUM OF PARTICLE DIAMETER	(M)
0.0	H-1	MINIMUM OF COOLANT VELOCITY	(M/S)
0.0	H-1	MAXIMUM OF COOLANT VELOCITY	(M/S)
1.5E+05	D-1	MINIMUM OF PRESSURE	(PA)
5.0E+05	D-2	MAXIMUM OF PRESSURE	(PA)
0.5E+05	D-3	INCREMENT OF PARTICLE DIAMETER	(M)
0.08	E-1	MINIMUM OF BED HEIGHT	(M)
0.08	E-2	MAXIMUM OF BED HEIGHT	(M)
0.0	F-1	MINIMUM OF WATER LEVEL ON THE BED	(M)
0.0	F-2	MAXIMUM OF WATER LEVEL ON THE BED	(M)
1.5E-03	G-1	MINIMUM OF PARTICLE DIAMETER	(M)
1.5E-03	G-2	MAXIMUM OF PARTICLE DIAMETER	(M)
0.0	H-1	MINIMUM OF COOLANT VELOCITY	(M/S)
0.0	H-1	MAXIMUM OF COOLANT VELOCITY	(M/S)
E	J-1	END OF THE INPUT DATA	

Fig.B.5 解析プログラム用サンプル入力データ例

```

//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 39273733,YU.ABE,0957.01
    T.2 W.0 I.0 C.3 GRP
    OOPTP PASSWORD= ,NOTIFY=J3733
/*
//***** EXEC PGM=STANDARD
//STEADY EXEC PGM=DETAIL
//STEPLIB DD DSN=J3733.COOL.STEADY.LOAD,DISP=SHR
//FT05F001 DD DSN=J3733.COOL.STEADY.DATA(N00602N1),DISP=SHR
//FT06F001 DD DUMMY
//**06F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FA,LRECL=137,BLKSIZE=137)
//FT07F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FA,LRECL=137,BLKSIZE=137)
//FT10F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSCOMM.DATA(WORK),DISP=SHR
//FT20F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSPLOT.DATA(WORK),DISP=SHR
//**30F001 DD DSN=J3733.COOL.SRILOTS.DATA(*****),DISP=SHR
/*
//ROPS EXEC PGM=TEMPNAME
//STEPLIB DD DSN=J3352.ROPSII.BATCH.LOAD,DISP=SHR
//FT01F001 DD DSN=&&SPLEDIT,UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(100,10),RLSE),
//           DISP=(NEW,PASS),DCB=(DSORG=PS)
//FT05F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSCOMM.DATA(WORK),DISP=SHR
//FT06F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FA,LRECL=137,BLKSIZE=137)
//GDFILE DD SYSOUT=*,OUTLIM=0
++
//

```

Fig.B.6 ドライアウト解析用 JCL

```

//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 39273733,YU.ABE,0957.01
    T.4 W.0 I.0 C.3 GRP
    OOPTP PASSWORD=      ,NOTIFY=J3733
/*
//STEADY   EXEC PGM=STANDARD
//*****   EXEC PGM=DETAIL
//STEPLIB  DD DSN=J3733.COOL.STEADY.LOAD,DISP=SHR
//FT05F001 DD DSN=J3733.COOL.STEADY.DATA(N00000T1),DISP=SHR
//FT06F001 DD DUMMY
//**06F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FA,LRECL=137,BLKSIZE=137)
//FT07F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FA,LRECL=137,BLKSIZE=137)
//**10F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSCOMM.DATA(WORK),DISP=SHR
//**20F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSPLOT.DATA(WORK),DISP=SHR
//FT30F001 DD DSN=J3733.COOL.SRILOTS.DATA(N00000T1),DISP=SHR
/*
//STROIN   EXEC PGM=TEMPNAME
//STEPLIB  DD DSN=J3733.COOL.STROIN.LOAD,DISP=SHR
//FT05F001 DD DSN=J3733.COOL.SRIINPUT.DATA(N00000T1),DISP=SHR
//FT06F001 DD DUMMY
//**06F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FA,LRECL=137,BLKSIZE=137)
//FT11F001 DD DSN=&&WORK1,UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(1,1),RLSE)
//FT12F001 DD DSN=&&WORK2,UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(1,1),RLSE)
//FT13F001 DD DSN=&&WORK3,UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(1,1),RLSE)
//FT14F001 DD DSN=&&WORK4,UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(1,1),RLSE)
//FT21F001 DD DSN=J3733.COOL.SRILOTS.DATA(N00000T1),DISP=SHR
//FT40F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSPLOT.DATA(WORK),DISP=SHR
//FT50F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSCOMM.DATA(WORK),DISP=SHR
/*
//ROPS     EXEC PGM=TEMPNAME
//STEPLIB  DD DSN=J3352.ROPSII.BATCH.LOAD,DISP=SHR
//FT01F001 DD DSN=&&SPLEDIT,UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(100,10),RLSE),
//           DISP=(NEW,PASS),DCB=(DSORG=PS)
//FT05F001 DD DSN=J3733.COOL.ROPSCOMM.DATA(WORK),DISP=SHR
//FT06F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FA,LRECL=137,BLKSIZE=137)
//GDFILE   DD SYSOUT=*,OUTLIM=0
/*
// EXEC REMEM,DSN=J3733.COOL.ROPSPLOT,Q=.DATA,ELM=WORK,NELM=N00000T1
++
*/

```

Fig.B.7 パラメータ解析用 JCL

```

C
CCCC / CHARAC /
C
  DATA LFIG   / 'Z4014', 'ZNLP'           /
  DATA LDSNP  / 'J3733.COOL.ROPSPLOT.DATA(WORK)'      /
  DATA LDUMMY / 'A DUMMY DATUM FOR THE ROPS PLOTTER FILE'  /
  DATA LCLM1  / 'NO PARAMETERS'          /
*      'PRESSURE (PA)'                  /
*      'BEDS HIGHT (M)'                /
*      'WATER LEVEL ON THE BED (M)'   /
*      'HIGHT OF SUBCOOL ZONE (M)'    /
*      'PARTICLE DIAMETER (M)'        /
*      'POROSITY'                     /
*      'COOLANT VELOCITY (M/S)'       /
*      'SUBCOOL TEMPERATURE (DEG-C)'  /
*      'REYNOLDS NOMBRE'             /
*      'DRYOUT HEAT FLUX (W/M2)'     /
*      'DRYOUT HIGHT (M)'             /
*      'OVER ALL PRESSURE DROP (PA)'  /
*      'PRESSURE DROP IN PACKED 2-PHASE (PA)' /
  DATA LCLM2  / 'P<PRESSURE (>P<A)'          /
*      'B<EDS >H<IGHT (M)'          /
*      'W<ATER L<EVEL ON THE B<ED (M)'   /
*      'H<IGHT OF >S<UBCOOL >Z<ONE (M)' /
*      'P<ARTICLE >D<IAMETER (M)'       /
*      'P<OROSITY'                   /
*      'C<OOLANT >V<ELOCITY (M/S)'     /
*      'S<UBCOOLING (?+<0%)'         /
*      'R<EYNOLDS >N<OMBER'          /
*      'D<RYOUT >H<EAT >F<LUX (>W/<M?+2%)' /
*      'D<RYOUT >H<IGHT (M)'         /
*      'O<VERALL >P<PRESSURE >D<ROP (>P<A)' /
*      'P<PRESSURE >D<ROP IN >P<ACKED 2->P (P<A)' /

```

Fig.B.8 作図データ変換プログラム用ロードモジュールの作成方法

```

//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 39273733,YU.ABE,0957.01
    T.O W.O I.O C.O
    OPTP PASSWORD=      ,NOTIFY=J3733
// EXEC FORT77,SO=J3733.COOL.STROIN,A='ELM(*)'
///*EXEC DELETE,DSN=J3733.COOL.STROIN.LOAD
// EXEC LKEDCT77,LM=J3733.COOL.STROIN,UNIT=D0950
++
//
```

Fig.B.9 作図データ変換プログラム用ロードモジュール作成のための JCL

2	A-1	OUTPUT POTION
E<FFECT OF >R<ELATIVE >P<ERMEABILITY	B-1	TITLE
P=0.1(MP<A) >H<=85(MM) >V?-<L0%=0(<M/S)	C-1	LABEL
5	D-1	X-AXIS NO.
10	D-2	Y-AXIS NO.
0	D-3	PARAMETER NO.
1.0E+05	E-1	CONDITION(P)
0.085	E-2	CONDITION(H)
0.0	E-3	CONDITION(WL)
0.0	E-4	CONDITION(VLO)
5	F-1	NO. OF FILES
<N=3	G-1	ID FOR THE FILE-1
1	G-2	DISCRIPTION OPTION
<N=4	G-1	ID FOR THE FILE-2
1	G-2	DISCRIPTION OPTION
<N=5	G-1	ID FOR THE FILE-3
1	G-2	DISCRIPTION OPTION
<N=6	G-1	ID FOR THE FILE-4
1	G-2	DISCRIPTION OPTION
E<XPERIMENTAL >D<ATA	G-1	ID FOR THE FILE-5
2	G-2	DISCRIPTION OPTION

Fig.B.10 作図データ変換プログラム用サンプル入力データ例

```

C
CCCC / CONS2 /
C
    DATA A      / 'PRESSURE (M)           '
#          'BED HIGHT (M)           '
#          'WATER LEVEL ON THE BED (M) '
#          'PARTICLE DIAMETER (M)     '
#          'COOLANT VELOCITY (M/S)    '
#          'COOLANT TEMPERATURE (DEG-C) '
C
CCCC / INIT1 /
C
    DATA IRECI   / 0   /
    DATA IRECO   / 0   /
    DATA IEND    / 0   /
C
CCCC / PLOT1 /
C
    DATA CHDATA  /  '
    DATA XLIST   / 'EFFECTIVE >SATURATION '
    DATA YLIST   / 'ELEVATION (M)          '
    DATA IPFN    / 'J3733.COOL.ROPSLOT.DATA(WORK) '
C
CCCC / PLOT2 /
C
    DATA NPLLOT  /      0 /
    DATA IQP     /      0 /
    DATA ISP     / 100*0 /
    DATA IMINP   /      0 /

```

Fig.B.11 ロードモジュールの作成方法

```

//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 39273733,YU.ABE,0957.01
    T.O W.O I.2 C.0
    OOPTP PASSWORD=      ,NOTIFY=J3733
/*
// EXEC FORT77,SO=J3733.COOL.STEADY,A='ELM(*)'
// EXEC DELETE,DSN=J3733.COOL.STEADY.LOAD
// EXEC LKEDCT77,LM=J3733.COOL.STEADY,UNIT=D0950
// EXEC REMEM,DSN=J3733.COOL.STEADY,
//       ELM=TEMPNAME,NELM=STANDARD
/*
// EXEC FORT77,SO=J3733.COOL.STEADY,A='ASTER,ELM(*)'
// EXEC LKEDCT77,LM=J3733.COOL.STEADY,DISP=SHR,UNIT=D0950
// EXEC REMEM,DSN=J3733.COOL.STEADY,
//       ELM=TEMPNAME,NELM=DETAIL
++
//
```

Fig.B.12 ロードモジュール作成のための JCL