

サブチャンネル解析コードASFRE-Ⅲの整備・改良

— ポーラス状閉塞モデルの高度化 —

1996年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの整備・改良 — ポーラス状閉塞モデルの高度化 —

大島 宏之*

要 旨

高速炉においては、その稠密な燃料格子構造および高い出力密度ゆえ、燃料集合体局所異常／事故は安全評価上重要な事象として認識されている。ワイヤースペーサ型のバンドル体系では、過去の試験結果等により起因事象として厚みのあるポーラス状の閉塞を想定することが最も現実的と考えられるが、その事象評価には、閉塞の形状・大きさ・位置、閉塞物のポロシティ・材質等パラメータが多く、解析コードを介した検討が必要となる。

本研究では、このポーラス状流路閉塞事象評価の精度向上を目的として、昨年度単相サブチャンネル解析コードASFRE-IIIに組み込んだポーラス状閉塞モデルの高度化を実施した。ここでは、閉塞領域内の熱流動現象をより忠実に再現するために、充填層理論に基づく圧力損失、熱伝導そして熱伝達に関する相関式を新たに組み込んだ。また、仏で行われたポーラス状流路閉塞模擬試験Scarlet-2のデータを基に機能検証解析を行うことにより、閉塞領域内の冷却材ピーク温度およびその発生位置を良好に再現できることを確認した。

詳細なモデル検証は、今後予定されている水／ナトリウム炉外試験の結果を待ち、実施する予定である。

* 大洗工学センター基盤技術開発部熱流体技術開発室

Improvement of Single-Phase Subchannel Analysis Code ASFRE-III

- Modification and Verification of Porous Blockage Model -

Hiroyuki. OHSHIMA*

Abstract

The purpose of the study is to offer an analytical tool for investigations of local subassembly accidents which have been recognized as a key issue of the safety assessment of liquid metal cooled fast breeder reactors due to the dense structure of the fuel grid and the high power density.

The porous blockage model, which was implemented in the single-phase subchannel analysis code ASFRE-III last year, was upgraded for the accuracy improvement. Correlation equations on pressure loss, heat conduction and heat transfer based on the packed bed theory was newly applied to the model in order to more precisely evaluate thermal hydraulic phenomena in the porous blockage regions. The model verification analysis was carried out on the basis of the data of porous blockage simulation test Scarlet-2 performed in France. In the analysis, it was confirmed that this model could reproduce coolant temperature distribution in the blockage region and could predict the peak temperature with high accuracy. The detailed model validation will be carried out by using the water/sodium out-of-pile tests which have scheduled to be conducted at PNC in the near future.

* Thermal Hydraulics Research Section, O-arai Engineering Center

目 次

図表リスト	IV
記号表	VI
1. 緒 言	1
2. ポーラス状流路閉塞モデル	3
2. 1 モデルの概要	3
2. 2 基礎式	3
2. 3 数値解法	4
2. 3. 1 差分式	4
2. 3. 2 エネルギー保存式と燃料ピン熱伝導方程式との結合	6
2. 4 物理モデル相関式	7
2. 4. 1 閉塞領域内圧力損失	7
2. 4. 2 閉塞領域内熱伝導	9
2. 4. 3 閉塞領域内熱伝達（被覆管またはラッパー管-冷却材）	11
2. 4. 4 閉塞領域内熱伝達（閉塞物-冷却材）	13
2. 4. 5 閉塞領域内熱伝達（被覆管またはラッパー管-閉塞物）	13
2. 5 平板閉塞の取り扱い	14
3. 検証解析	20
3. 1 Scarlet-2試験の概要	20
3. 2 解析条件	21
3. 3 解析結果および考察	21
4. まとめ	33
5. 参考文献	34
6. 謝 辞	36
付録1 入力仕様の変更	37
付録2 追加配列・追加COMMON変数、追加・変更サブルーチンの機能	39
付録3 コレクション・セット	41
付録4 ポーラス状閉塞モデル：モデルパラメータの検討	49
付録5 検証解析用入力データリスト	75

図表リスト

表2-1	種々の粒子の形状係数 ϕ_c (Carmanの形状係数)	15
表A4-1	集合体形状データ	54
表A4-2	境界条件	54
表A4-3	閉塞部条件	54
表A4-4	軸方向メッシュ分割	55
表A4-5	解析ケース	55
図2-1	閉塞サブチャンネルの横方向断面	16
図2-2	混合拡散パラメータ $\alpha\beta$ と無次元粒径の関係	17
図2-3	粉粒体固定層における伝熱モデル	17
図2-4	ϕ と k_s/k_f の関係	18
図2-5	a_1^2 と $\Phi(b)$ の関係	18
図2-6	固定層の管壁における流れと伝熱の状態	19
図3-1	Scarlet-2試験体断面図	24
図3-2	サブチャンネル分割及び閉塞部配置図	25
図3-3	軸方向メッシュ分割図	26
図3-4	流速及び温度の参照断面	27
図3-5	軸方向断面内流速場及び温度場	28
図3-6	軸方向断面内閉塞領域近傍流速場及び温度場拡大図	29
図3-7	冷却材軸方向流速分布	30
図3-8	冷却材軸方向温度分布	31
図3-9	冷却材軸方向温度分布に関する実験データと解析との比較	32
図A4-1	閉塞領域におけるワイヤースペースと各サブチャンネルの位置関係	56
図A4-2	冷却材軸方向流速分布(ケース1)	57
図A4-3	冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図(ケース1)	57
図A4-4	冷却材横方向流速分布(ケース1)	58
図A4-5	冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図(ケース1)	58
図A4-6	冷却材軸方向温度分布(ケース1)	59
図A4-7	冷却材軸方向温度分布(ケース1)	59
図A4-8	冷却材軸方向流速分布(ケース2)	60
図A4-9	冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図(ケース2)	60
図A4-10	冷却材横方向流速分布(ケース2)	61
図A4-11	冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図(ケース2)	61
図A4-12	冷却材軸方向温度分布(ケース2)	62

図A 4-13	冷却材軸方向温度分布（ケース2）	62
図A 4-14	冷却材軸方向流速分布（ケース3）	63
図A 4-15	冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース3）	63
図A 4-16	冷却材横方向流速分布（ケース3）	64
図A 4-17	冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース3）	64
図A 4-18	冷却材軸方向温度分布（ケース3）	65
図A 4-19	冷却材軸方向温度分布（ケース3）	65
図A 4-20	冷却材軸方向流速分布（ケース4）	66
図A 4-21	冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース4）	66
図A 4-22	冷却材横方向流速分布（ケース4）	67
図A 4-23	冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース4）	67
図A 4-24	冷却材軸方向温度分布（ケース4）	68
図A 4-25	冷却材軸方向温度分布（ケース4）	68
図A 4-26	冷却材軸方向流速分布（ケース5）	69
図A 4-27	冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース5）	69
図A 4-28	冷却材横方向流速分布（ケース5）	70
図A 4-29	冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース5）	70
図A 4-30	冷却材軸方向温度分布（ケース5）	71
図A 4-31	冷却材軸方向温度分布（ケース5）	71
図A 4-32	冷却材軸方向流速分布（ケース6）	72
図A 4-33	冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース6）	72
図A 4-34	冷却材横方向流速分布（ケース6）	73
図A 4-35	冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図（ケース6）	73
図A 4-36	冷却材軸方向温度分布（ケース6）	74
図A 4-37	冷却材軸方向温度分布（ケース6）	74

記号表

A_{bb}	閉塞物－閉塞物間面積	[m ²]
A_{bf}	閉塞物－流体間面積	[m ²]
A_{bw}	閉塞物－燃料ピン間面積	[m ²]
A_{ff}	流体－流体間面積	[m ²]
A_{fw}	流体－燃料ピン間面積	[m ²]
a_v	単位充填容器あたりの充填物表面積	[1/m]
C_p	定圧比熱	
d_H	水力等価直径	[m]
D_p	充填物代表径	[m]
F	drag force	[Pa/m]
h_0	複合熱伝達係数	[W/m ² k]
h_r	輻射伝熱係数	[W/m ² k]
h_w	見かけの熱伝達係数	[W/m ² k]
k_e°	流れを伴わない固定層の有効熱伝導率	[W/m k]
k_{eff}	流れを伴う有効熱伝導率	[W/m k]
k_{ew}	壁表面から $d_p/2$ の領域に関する有効熱伝導率	[W/m k]
k_f	冷却材熱伝導率	[W/m k]
k_s	固体の熱伝導率	[W/m k]
L	閉塞物長さ	[m]
P	圧力	[Pa]
Pr	プラントル数	[-]
q	熱流束	[W/m ²]
Re	レイノルズ数	[-]
T_b	閉塞物温度	[k]
T_w	壁表面温度	[k]
u	横方向流速	[m/sec]
V_T	C. V. 体積	[m ³]
v	Superficial velocity (actual velocity x porosity)	[m/sec]
w	軸方向流速	[m/sec]
z	軸方向長さ、座標	[m]
σ_k	横方向流速の向きの定義に合わせるための符号	[-]
ϵ	ポロシテイ	[-]
κ	固体熱伝導率と冷却材熱伝導率の比(k_s/k_f)	[-]
$\theta_{k'}$	$u_{k',1}$ と隣接する横方向流速がなす角度	[rad.]
λ	圧力損失係数	[-]

μ	粘性係数	[Kg/m sec]
ρ_b	閉塞物密度	[Kg/m ³]
ρ_f	冷却材密度	[Kg/m ³]
ϕ	形状係数	[-]
ϕ_c	Carmanの形状係数	[-]
ϕ_w	流体有効厚さと粒子径の比	[-]

Subscript

b	閉塞物
f	流体

1. 緒 言

高速炉の燃料集合体は、高エネルギー側での核分裂効率化のため稠密な燃料格子構造となっており、その線出力も軽水炉等に比べて2倍以上に高く設定される。このため、異物の混入により燃料ピンの冷却が阻害されたり、何らかの原因で正の反応度が投入され発熱量が増加するなど、局所的に発熱と除熱のバランスが崩れた場合、燃料ピンの損傷もしくは炉心物質の溶融により熱的に損傷領域が拡大する懸念がある。このような理由から、発熱／除熱のバランスが崩れる事象、いわゆる燃料集合体局所異常／事故は、高速炉の安全評価上重要な事象として認識されている。

燃料集合体局所事故の起因事象は、濃縮度異常等による局所発熱、異物混入等による局所閉塞、統計的なピン破損であるランダム破損と、大きく3つに分類することができる(1),(2)。興味深いことには、これらの事象進展を考察する際に、いずれのシーケンスにおいても流路閉塞事象の評価が不可欠となることである(3)。従来、流路閉塞の研究は平板状のものを想定して行われてきたが(例えば文献(4)など)、フランスで行われたABACUS試験(5)やドイツでの試験(6)によれば、ワイヤースペーサ型バンドル体系において平板という仮定は過度な保守性を与えるもので、むしろポーラス状の閉塞が最も現実的な設定あることが明かにされた。

ポーラス状閉塞事象の評価については、閉塞発生時の流路チャンネル内の熱流動挙動を確認する試験がいくつか行われているが(7),(8)、閉塞の発生状況や発生位置、大きさ、形状、除熱への影響がバンドル形状に依存すること、また、閉塞物自体もポロシティや物性値など非常にパラメータが多いため、定量的かつ包絡的な事象評価には解析コードを介した検討が必要である。

本研究の目的は、これらのポーラス状閉塞事象に対して熱流動に関する評価ツールの1つを提供することである。ベースとした評価ツールは、熱流体技術開発室において開発されてきた单相サブチャンネルコードASFRE-III(9)である。

ASFRE-IIIは、燃料集合体の健全なピン束形状下における冷却材の熱流動挙動を取扱うべく開発された解析コードであり、グリッドスペーサ、ワイヤースペーサ両タイプのバンドル体系に適用できる。特に後者の場合、Distributed Resistance Model(10)により流動に対するワイヤースペーサの効果を詳細に模擬できるという特徴を有する。ASFRE-IIIは、既に局所事故事象解析用にSolidな閉塞物が集合体内に存在する場合の冷却材の熱流動解析機能を備えているが、この閉塞モデルは閉塞物の境界で流速を与え冷却材との境界条件とする簡単なもので、閉塞領域内については何も解かない。ポーラス状閉塞についてもグリッドスペーサーモデルにより、閉塞領域内の圧損と流路減少による定常での冷却材温度に対

する影響についてはある程度評価可能であるが、閉塞領域内の横方向流速成分、閉塞物の温度及び過渡解析時に必要な閉塞物の熱容量の効果などについては評価不能であった。

これに対して昨年度は、閉塞領域内の流体の横方向運動量と閉塞物のエネルギー式を他の保存式と結合し、同時に解くことによりこれらを考慮できるポーラス閉塞モデルを作成した。しかしながら、この追加モデルは、ポーラス閉塞の取り扱いを可能としたいいわゆる「骨組み」のみに留まり、必要とする相関式に対しては暫定的に簡易式をあてはめて機能確認をしたものであった。そこで今回は、この必要とされる相関式（閉塞領域内の圧力損失や熱伝導・熱伝達など）に対して、可能な限り精度の高い理論式もしくは経験式を適用し、モデルの高度化を図った。また、モデルの詳細な検証は今後実施される一連のポーラス状流路閉塞試験結果を待たなければならないが、ここではフランスで実施されたナトリウム試験Scarlet-2（19本ピンバンドル体系）の文献値を用いて確認解析を行った。

第2章において、ASFRE-IIIに組込んだポーラス状流路閉塞モデルの定式化・数値解法および各相関式の詳細を示す。第3章では機能確認のためのScarlet-2試験解析とその結果を示す。また、ポーラス状流路閉塞モデルに使用されるモデルパラメータのいくつかに関する感度解析の結果および考察を別途付録4に示す。

なお、コードの改修にともない必要になった入力データの仕様変更と追加した主要な配列変数、COMMON変数などの説明、コレクションセットをそれぞれ付録1、2、3として、また、検証解析に使用した入力データの一例を付録5として載せる。

2. ポーラス状流路閉塞モデル

2.1 モデルの概要

ASFRE-IIIコードのポーラス状閉塞モデルは、従来の質量、エネルギーに関するコントロールボリューム（以下C.V.と記述する）単位で定義するポーラス状の流路閉塞物に対して、そのエネルギー式を流体のエネルギー式および燃料ピン熱伝導式と結合し、他の保存式と同時に解くものである。集合体内における一般的な閉塞の例として、図2-1に閉塞サブチャンネルの水平断面を示す。図中、斜線部が閉塞物を表し、C.V.内の他の空白部を流体が占める。このような閉塞に対してモデルで設定した仮定は以下のとおりである。

- ・閉塞領域内において、閉塞物は均質の連続体である。
- ・燃料ピンは、閉塞物と流体の両方に接している。
- ・volume porosityと軸方向、横方向のarea porosityは、それぞれ別個の値を取り得る。
- ・閉塞領域内でのみ、閉塞物-流体間の熱伝達、摩擦が生じる。

閉塞物を定義するC.V.に対して、porous body approach⁽¹⁾を用いて閉塞物のエネルギー式および流体の各保存式を定式化している。また、volume porosity, 軸方向area porosity, 横方向area porosityおよび燃料ピン表面上でのarea porosityは、すべて独立して入力で指定できるので、様々な閉塞形状に対応できる。

2.2 基礎式

ASFRE-IIIコードで解かれる基礎式は、流体の質量、運動量、エネルギー保存式および閉塞物のエネルギー保存式である。それぞれをPorous body approachの手法に従って、volume porosity ϵ を用いて表すと以下のようなになる。

a. 流体の質量保存式

$$\epsilon \frac{\partial \langle \rho_f \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_T} \int_{A_{ff}} \rho_f \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (1)$$

b. 流体の運動量保存式

$$\begin{aligned} \epsilon \frac{\partial \langle \rho_f \vec{v} \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_T} \int_{A_{ff}} \rho_f \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA &= \epsilon^i \langle \rho_f \rangle \vec{g} \\ &+ \frac{1}{V_T} \int_{A_{ff}} (-P \vec{n} - \vec{\tau} \cdot \vec{n}) dA \\ &+ \frac{1}{V_T} \int_{A_{fw}} (-P \vec{n} - \vec{\tau} \cdot \vec{n}) dA \\ &+ \frac{1}{V_T} \int_{A_{fb}} (-P \vec{n} - \vec{\tau} \cdot \vec{n}) dA \end{aligned} \quad (2)$$

c. 流体のエネルギー保存式

$$\varepsilon \frac{\partial^i \langle \rho_f e_f \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_T} \int_{A_{ff}} \rho_f e_f \vec{v} \cdot \vec{n} dA = - \frac{1}{V_T} \int_{A_{fw}} \vec{q}_f \cdot \vec{n} dA - \frac{1}{V_T} \int_{A_{ff}} \vec{q}_f \cdot \vec{n} dA - \frac{1}{V_T} \int_{A_{fb}} \vec{q}_f \cdot \vec{n} dA - \varepsilon^i \langle P \nabla \cdot \vec{v} \rangle \quad (3)$$

d. 閉塞物のエネルギー保存式

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial^i \langle \rho_b e_b \rangle}{\partial t} = - \frac{1}{V_T} \int_{A_{bw}} \vec{q}_b \cdot \vec{n} dA - \frac{1}{V_T} \int_{A_{bb}} \vec{q}_b \cdot \vec{n} dA - \frac{1}{V_T} \int_{A_{bf}} \vec{q}_b \cdot \vec{n} dA \quad (4)$$

ここで、 ρ , \vec{v} , P , e はそれぞれ、密度、流速、圧力、内部エネルギーを、 \vec{g} , $\vec{\tau}$, \vec{q} はそれぞれ重力加速度、剪断応力テンソル、熱流束を表す。 V_T は C.V. の全体積を表し、 A_{ff} , A_{fw} , A_{bb} , A_{bw} および A_{fb} または A_{bf} は図 2-1 に示したように、それぞれ流体-流体間、流体-燃料ピン間、閉塞物-閉塞物間、閉塞物-燃料ピン間、および流体-閉塞物間の面積を表す。

また、 \vec{n} は、それらの面に垂直な単位ベクトルを表す。subscript f, b はそれぞれ流体、閉塞物の区別に使っている。 $i \langle \rangle$ は、intrinsic volume average を表し、その意味は、例えば流体のある状態量 ϕ_f を用いると、次の(5)式で表すことができる。

$$i \langle \phi_f \rangle \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \phi_f dV \quad (5)$$

ここで、 V_f は、C.V. 内で占める体積である。C.V. の全体積を V_T とすると、volume porosity は次の(6)式で定義できる。

$$\varepsilon \equiv \frac{V_f}{V_T} \quad (6)$$

(2)式の右辺第4項、(3)式の右辺第3項はそれぞれ、流体-閉塞物間の摩擦力、熱伝達を表す。閉塞物のエネルギー式(4)の右辺は、順に閉塞物-燃料ピン間の熱伝達、閉塞物どうしの熱伝導、閉塞物-流体間熱伝達を表す。

2.3 数値解法

2.3.1 差分式

(1)~(4)式に示した各基礎方程式に対して差分化を以下に示す。ここでは時間項に対し

ては前進差分を、対流項に対しては1次風上差分を使用している。

a. 流体の質量保存差分式

$$V_{fi,l} \frac{\rho_{fi,l}^{n+1} - \rho_{fi,l}^n}{\Delta t} + \langle A_{fa} \rho_f^n w^{n+1} \rangle_{i,l+1/2} - \langle A_{fa} \rho_f^n w^{n+1} \rangle_{i,l-1/2} + \sum_k [\sigma_k \langle A_{fl} \rho_f^n u^{n+1} \rangle_{k,l}] = 0 \quad (7)$$

b. 流体の軸方向運動量保存差分式

$$V_{fi,l+1/2} \frac{(\rho_f^n w^{n+1})_{i,l+1/2} - (\rho_f^n w^n)_{i,l+1/2}}{\Delta t} + \langle A_{fa} \rho_f w w \rangle_{i,l+1}^n - \langle A_{fa} \rho_f w w \rangle_{i,l}^n + \sum_k [\sigma_k \langle A_{fl} \rho_f w u \rangle_{k,l+1/2}^n] = - \frac{A_{fak,l+1/2} + A_{fak,l-1/2}}{2} (P_{i,l+1}^{n+1} - P_{i,l}^{n+1}) - F_{wai,l+1/2}^{n+1} - F_{bai,l+1/2}^{n+1} - (V_f \rho_f^n)_{i,l+1/2} g \quad (8)$$

b'. 流体の横方向運動量保存差分式

$$V_{fk,l} \frac{(\rho_f^n u^{n+1})_{k,l} - (\rho_f^n u^n)_{k,l}}{\Delta t} + \langle A_{fl} \rho_f u w \rangle_{k,l+1/2}^n - \langle A_{fl} \rho_f u w \rangle_{k,l-1/2}^n + \sum_{k'} [\cos \theta_{k'} \langle A_{fl} \rho_f u u \rangle_{k',l}^n] = - \frac{V_{fk,l}}{L_{k,l}} (P_{j_1,l}^{n+1} - P_{j_2,l}^{n+1}) - F_{wfk,l}^{n+1} - F_{bfk,l}^{n+1} \quad (9)$$

c. 流体のエネ르기ー保存差分式

$$V_{fi,l} \frac{(\rho_f e_f)_{i,l}^{n+1} - (\rho_f e_f)_{i,l}^n}{\Delta t} + \langle A_{fa} \rho_f^n e_f^n w^{n+1} \rangle_{i,l+1/2} - \langle A_{fa} \rho_f^n e_f^n w^{n+1} \rangle_{i,l-1/2} + \sum_k [\sigma_k \langle A_{fl} P_f^n e_f^n u^{n+1} \rangle_{k,l}] = Q_{fwi,l}^{n+1} + Q_{fbi,l}^{n+1} + Q_{ffi,l}^{n+1} \quad (10)$$

d. 閉塞物のエネ르기ー保存式

$$V_{bi,l} \frac{(\rho_b e_b)_{i,l}^{n+1} - (\rho_b e_b)_{i,l}^n}{\Delta t} = Q_{bwi,l}^{n+1} + Q_{bfi,l}^{n+1} + Q_{bbi,l}^{n+1} \quad (11)$$

差分化にあたり、前の基礎式に含まれていた(2)式の粘性項と(3)式の圧力仕事の項は無視できるものとして省略した。

ここで使用している記号 w, u, Q は、それぞれ軸方向流速、横方向流速、熱伝導または熱伝達による仕事率の C.V. 内の収支を表す。 V_b, A_{fb}, A_{fl} はそれぞれ閉塞物の C.V. 中で占める体積、流体の軸方向および横方向の流路面積を表す。また i, l, k, k' は、それぞれサブチャンネル番号、軸方向一、ギャップ番号、隣接ギャップ番号を示し、 $\sigma_k, \theta_{k'}$ はそれぞれ次の意味を持つ。

σ_k : 横方向流速の向きの定義に合わせるための符号

$\theta_{k'}$: $u_{k,l}$ と隣接する横方向流速がなす角度

先に示した差分式は、いくつかの非線型項を含む。例えば、流体の密度や内部エネルギーは、温度に関して非線型な相関式を用いて近似されている。従って、両エネルギー式(10)、(11)式の時間項だけではなく、質量保存式(7)式の時間項も非線型である。しかし、実際に解く場合には、次のような近似式を使用してすべて線型化する。(7)、(10)および(11)式の時間項は次の(12)、(13)および(14)式に示すように近似できる。

$$\frac{\rho_f^{n+1} - \rho_{f,l}^n}{\Delta t} \equiv \frac{\left(\frac{\partial \rho_f}{\partial T_f}\right)^n \Delta T_f}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\frac{(\rho_f e_f)^{n+1} - (\rho_f e_f)^n}{\Delta t} \equiv \frac{e_f^n \left(\frac{\partial \rho_f}{\partial T_f}\right)^n \Delta T_f + \rho_f^n \left(\frac{\partial e_f}{\partial T_f}\right)^n \Delta T_f}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\frac{(\rho_b e_b)^{n+1} - (\rho_b e_b)^n}{\Delta t} \equiv \frac{e_b^n \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b}\right)^n \Delta T_b + \rho_b^n \left(\frac{\partial e_b}{\partial T_b}\right)^n \Delta T_b}{\Delta t} \quad (14)$$

ここで、 T_f, T_b はそれぞれ流体と閉塞物の温度で、独立変数として扱う。

2.3.2 エネルギー保存式と燃料ピン熱伝導方程式との結合

燃料ピン表面での平均熱流束は、次式で表される。

$$\left(Q'_{fw} \cdot A'_{fw} + Q'_{bw} \cdot A'_{bw} \right) / \left(A'_{fw} + A'_{bw} \right) \quad (15)$$

同様に、ラッパ管表面での平均熱流束は次式で表される。

$$\left(Q''_{fw} \cdot A''_{fw} + Q''_{bw} \cdot A''_{bw} \right) / \left(A''_{fw} + A''_{bw} \right) \quad (16)$$

この時、

$$Q'_{fw} + Q'_{bw} = Q_{fw} \quad (17)$$

$$A'_{fw} + A'_{bw} = A_{fw} \quad (18)$$

$$A''_{bw} + A''_{fw} = A_{bw} \quad (19)$$

(15)式は、ピン表面での熱伝達相関式を用いて次のようにも表せる。

$$h_f^{n+1}(T_w^{n+1} - T_f^{n+1}) + h_b^{n+1}(T_w^{n+1} - T_b^{n+1}) \quad (20)$$

ここで、 h_f と h_b はピンとの接触面積比を考慮した流体と閉塞物の熱伝達率を表し、 T_w はピン表面温度を表す。

(20)式を燃料ピン熱伝導方程式の外側境界条件とし、中心から3重対角行列となる差分式を前進消去していくと最下行Nは次の形になる。

$$b_N^{n+1} T_w^{n+1} = f_N^{n+1} + h_f^{n+1} T_f^{n+1} + h_b^{n+1} T_b^{n+1} \quad (21)$$

(21)式を用いて、(10)、(11)式中の T_w^{n+1} を消去できる。ラッパー管表面温度 T_w^{n+1} も同様。これより、(11)式は T_f^{n+1} と T_b^{n+1} の線形結合となるから以下のように整理できる。

$$T_b^{n+1} = c_1 T_f^{n+1} + c_2 \quad (22)$$

(21)、(22)式を用いると(10)式は流体に関する独立変数と定数のみの式とすることができる。これ以降は、現行のアルゴリズムにより流体に関する独立変数について解くことができる。すなわち、運動量(8)、(9)式を用いて(7)、(10)式中の w 、 u を消去して、 P と T_f のみの式とし、さらに2x2のmatrix inversionを行うことにより圧力方程式を導出する。これを適当な境界条件によって解く。求められた P^{n+1} から w^{n+1} 、 u^{n+1} 、 T_f^{n+1} が計算できる。 T_f^{n+1} から(22)式によって T_b^{n+1} 、さらに(21)式から T_w^{n+1} を得ることができる。

2.4 物理モデル関連式

閉塞領域内の熱流動挙動予測精度を向上させるため、今回新たに変更・追加した物理モデルに必要な関連式について説明する。ここでは、熱伝達は数値安定性を考慮し温度に関してimplicitに、熱伝導は数値解法が複雑化するのを避けるためexplicitに扱う。また、圧力損失は流速に関してimplicitに扱っている。

2.4.1 閉塞領域内圧力損失

ポーラス状閉塞領域内の圧力損失関連式として、ASFRE-IIIコードは以下に示す3種類の関連式を選択できる。

1) ブラジウスの式[12]

閉塞領域内の圧力損失は、燃料ピン（またはラッパー管）によるものと閉塞物によるものとに分けることができる。燃料ピンによるものに関しては現行のモデル（ワイヤースペーサがある場合にはDistributed Resistance Modelなど）をそのまま使用し、閉塞物に関してはブラジウスの式をベースとして、入力で指定する閉塞物に対する水力等価直径により調節する。（このモデルは従来簡易的に用いられたものである。）

軸方向流速に対するDrag forceをFとすると、

$$F = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right) = \frac{\lambda}{d_H} \frac{\rho |w| w}{2} \quad (23)$$

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (24)$$

(23)式はTaylor展開を用いて次のように差分化される。

$$\begin{aligned} (F)^{n+1} &= (F)^n + \frac{\partial F}{\partial t} \Delta t = (F)^n + \frac{\partial F}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial t} \Delta t \\ &= \left(\frac{\lambda \rho}{d_H} |w^n| \right) w^{n+1} - \frac{\lambda \rho}{2d_H} |w^n| w^n \end{aligned} \quad (25)$$

横方向流速についても同様な式で評価される（水力等価直径は軸方向と独立に設定できる）。

2) Kozeny-Carmanの式^[13]

充填層を通過する体積流量は負の圧力勾配に比例するというDarcyの法則をベースとして、球、破碎固体、リングなどの粒子の充填層（Packed Bed）内を流れる単相ガスまたは液体に関する圧力損失相関式を、Kozenyの式を変形してCarmanが求めたものである。単位長さあたりの圧力損失は、次のように与えられる。

$$F = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right) = \frac{\lambda \rho a_v |v| v}{\varepsilon^3} = \frac{6 \lambda \rho (1-\varepsilon) |v| v}{\phi_c D_p \varepsilon^3} \quad (26)$$

但し、

$$Re = \frac{v \rho}{a_v \mu} = \frac{\phi_c D_p v \rho}{6(1-\varepsilon)\mu} = 0.01 \sim 10000 \quad (27)$$

ここで用いられている流速 v は、Superficial fluid velocityと呼ばれるもので、充填層内の実際の流速にポロシティを乗じたものである。

λ は層流（球、破碎固体などの中実粒子に対しては $Re < 2.0$ 、ラシヒリングのような中空粒子に対しては $Re < 0.25$ の範囲）では、精度 $\pm 10\%$ で次式により示される。

$$\lambda = 5 / Re \quad (28)$$

また、 Re 数がこれより大きな乱流範囲では精度 $\pm 35\%$ で次式により表される。

$$\lambda = \frac{5}{Re} + \frac{0.4}{Re^{0.1}} \quad (\text{乱流 中実粒子}) \quad (29)$$

$$\lambda = \frac{5}{Re} + \frac{1.0}{Re^{0.1}} \quad (\text{乱流 中空粒子}) \quad (30)$$

(26)式に現れるCarmanの形状係数 ϕ_c は定義により計算できるものであるが、表2-1に示すような値が提唱されている。燃料集合体内のポーラス状閉塞については、(もちろん閉塞形成物の種類にもよるが) おおよそ0.6~0.8が目安と考えられる。

(26)式はTaylor展開により次のように差分化される。

$$(F)^{n+1} = \frac{2\lambda\rho a_v |v^n|}{\varepsilon^3} v^{n+1} - \frac{\lambda\rho a_v |v^n|}{\varepsilon^3} v^n \quad (31)$$

3) Ergunの式[14]

Forchheimerが提唱した圧力勾配と流速の非線形な関係[15]を用いて、様々なポーラスメディアに対応できるよう多くの実験から導出された相関式で、次式で表される。

$$F = \left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right) = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu v}{D_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho |v| v}{D_p} \quad (32)$$

(なめらかな粒子で構成される場合は、右辺第1項の係数に180を、第2項の係数に1.8を使用した方がよいとの報告もある[16]が、汎用の観点からASFRE-IIIコードではオリジナルを適用している。)

(32)式をTaylor展開により、次のように差分化する。

$$(F)^{n+1} = \left(150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu}{D_p^2} + 3.5 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho |v^n|}{D_p} \right) v^{n+1} - 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho |v^n|}{D_p} v^n \quad (33)$$

2.4.2 閉塞領域内熱伝導

1) 冷却材—冷却材

ASFRE-IIIコード内において閉塞領域内の冷却材熱伝導は、次式により求められる。

i) 軸方向

$$q_{ffa}'' = k_f \frac{\Delta T_f}{\Delta z} \quad (34)$$

ii) 横方向

$$q_{fft}'' = k_f \frac{\Delta T_f}{l} \quad (35)$$

ここで、 k_f は冷却材の熱伝導率である。 l は横方向の伝熱長さを表し、隣接サブチャンネルとの重心間距離、または入力で指定するfactorを乗じたものを使用する。熱伝導率 k_f には、ミクロには冷却材物性値そのものを使用すればよいが、閉塞されたサブチャンネルのC. V.に対しては、そのマクロ的な観点から閉塞物の影響を加味した等価熱伝導率を用い

るべきである。ASFRE-IIIコードでは等価熱伝導率として、次に示す矢木・国井によりモデルを用いて導かれた有効熱伝導率 k_{eff} ^[17]を適用している。

$$\frac{k_{eff}}{k_F} = \frac{k_e^\circ}{k_F} + (\alpha\beta) Pr Re_p, \quad Re_p = \frac{\rho v D_p}{\mu}, \quad Pr = \frac{C_p \mu}{k_F} \quad (36)$$

右辺第1項は流れを伴わない固定層の有効熱伝導率で、第2項は流れの寄与分である。第2項の係数($\alpha \beta$)は流体の混合拡散を表すパラメータで、流体の流れ方向に対して熱の流れが横方向の場合には図2-2から求められる(0.08~0.2が目安。コード内では0.1をデフォルトとしている)。流速が比較的遅い場合($Re_p = 3 \sim 50$)は流れと同方向の熱伝導も重要であり、この場合係数($\alpha \beta$)は各種実験より0.7~0.8であることが矢木・国井・若尾により求められている(コード内では0.7がデフォルト)。

流れを伴わない時の有効熱伝導率 k_e° は、図2-3に示すような固定層内伝熱モデルを仮定して国井・Smithが理論式^[18]を求めている。

$$\frac{k_e^\circ}{k_F} = \varepsilon \left(1 + \frac{h_{rv} D_p}{k_F}\right) + \frac{1 - \varepsilon}{\frac{1}{\phi + \frac{h_{rs} D_p}{k_F}} + \frac{2}{3} \left(\frac{k_F}{k_s}\right)} \quad (37)$$

ここで、 h_{rv} , h_{rs} は輻射伝熱係数である。ASFRE-IIIコードでは、この理論式から(液体ゆえ)輻射の効果を見捨てた次式を採用している。

$$\frac{k_e^\circ}{k_F} = \varepsilon + \frac{1 - \varepsilon}{\phi + \frac{2}{3} \left(\frac{k_F}{k_s}\right)} \quad (38)$$

ϕ は粒子-粒子間の接触点近傍の流体液膜を通しての伝熱に関連した項(モデル化した液体薄膜の有効厚さと粒子径の比)であり、最疎充填として立方体配列、最密充填として斜方晶形配列を仮定したものをそれぞれ ϕ_1 , ϕ_2 とすると、

$$\phi = \phi_2 + (\phi_1 - \phi_2) \{(\varepsilon - 0.260/0.216)\} \quad (0.476 \geq \varepsilon \geq 0.260) \quad (39)$$

$$\phi = \phi_1 \quad (\varepsilon \geq 0.476 \text{ or } \varepsilon \leq 0.260) \quad (40)$$

より決定される。 ϕ_1 および ϕ_2 は、空隙内流体薄膜熱伝導^[19]モデルより k_s/k_F の関数として求められる。

$$\phi_i = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa}\right)^2 \sin^2 \varphi_0}{\ln \{ \kappa - (\kappa - 1) \cos \varphi_0 \} - \frac{\kappa - 1}{\kappa} (1 - \cos \varphi_0)} - \frac{2}{3} \left(\frac{1}{\kappa}\right), \quad \kappa = \frac{k_s}{k_F} \quad (41)$$

ここで、 $i=1$ の時は $\sin^2\phi_0 = 2/3$ を、 $i=2$ の時は $\sin^2\phi_0 = 1/4\sqrt{3}$ を代入する。図2-4に ϕ_i のグラフを示す。

2) 閉塞物—閉塞物

i) 軸方向

$$q_{bba}'' = k_s \frac{\Delta T_b}{\Delta z} \quad (42)$$

ii) 横方向

$$q_{bbt}'' = k_s \frac{\Delta T_b}{l} \quad (43)$$

ここで、 k_s は閉塞物の熱伝導率である。 l は流体—流体熱伝導で用いるものと同様である。

2.4.3 閉塞領域内熱伝達 (被覆管またはラッパ—管—冷却材)

サブチャンネル解析の場合、被覆管—冷却材間の熱輸送は、例えば3つの燃料ピン壁面に囲まれた1つのC.V.の中心で定義される冷却材温度 (すなわちC.V.の平均温度) と被覆管表面温度の差のみで評価されることになる。このようなマクロな扱いに対しては、同様な仮定で求められた複合熱伝達率 (overall heat transfer coefficient) h_0 を適用する。ASFRE-IIIコードでは、次式に示すYagi-Kuniiの式[20]を採用している。

$$\frac{h_0 D_p}{k_F} = \left(\frac{D_p}{d_H} \right) \left(\frac{k_{eff}}{k_F} \right) \left\{ a_1^2 + \Phi(b) / \xi \right\} \quad (44)$$

ここで、

$$b = \frac{h_w d_H}{2k_{eff}} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_H}{D_p} \right) \left(\frac{h_w D_p}{k_F} \right) / \left(\frac{k_{eff}}{k_F} \right) \quad (45)$$

$$\xi = \frac{4k_{eff}L}{\rho u_0 C_p d_H^2} = \frac{4 \left(\frac{D_p}{d_H} \right) \left(\frac{L}{d_H} \right) \left(\frac{k_{eff}}{k_F} \right)}{Pr \cdot Re_p} \quad (46)$$

また、 a_1^2 と $\Phi(b)$ は b の関数であり、次の式を解くことにより求められる (J_n はベッセル関数)。

$$bJ_0(a_1) = a_1J_1(a_1) \quad (47)$$

$$\Phi(b) = - \ln \left\{ \frac{4}{a_1^2 (1 + a_1^2 / b^2)} \right\} \quad (48)$$

コード内においては、 a_1^2 と $\Phi(b)$ のグラフ(図2-5)を3次関数で近似した式を使用している。

一方、(45)式に現れる h_w は管壁における見かけの熱伝達係数と呼ばれるもので、管壁近傍の固定層の特性を含む見かけ上のコンダクタンスを表す。図2-6に固定層の管壁近傍における流れと伝熱状態の模式図を示すが、 h_w は壁近傍(厚さ $D_p/2$ の層内)の有効熱伝導率 k_{ew} および層内部の k_{eff} の差として理解することができる。すなわち、

$$q_w = h_w(T_w - T_{ap}) = k_{ew}(T_w - T_b) \left(\frac{1}{2} D_p \right) \quad (49)$$

T_{ap} , T_b は図2-6に示すとおりである。従って、見かけの熱伝達係数 h_w は次式で求まる。

$$\frac{h_w D_p}{k_F} = \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_{ew}/k_F} - \frac{1}{k_{eff}/k_F} \right)} \quad (50)$$

k_{eff}/k_F は(36)式から求められる。壁表面から $D_p/2$ の領域に関する有効熱伝導率 k_{ew} は、流体が静止している場合に対する k_{ew}^0 と、流れの混合による熱エネルギー輸送の項の和として次のように表すことができる(21)。

$$\frac{k_{ew}}{k_F} = \frac{k_{ew}^0}{k_F} + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w Pr \cdot Re_p} + \frac{2}{h_w^* D_p / k_F}} \quad (51)$$

ここで、 α_w は壁近傍の流体の横方向混合割合を示し、ほぼ $\alpha_w \approx 0.02$ となる。 h_w^* は壁面上に生じる境界層の熱伝達係数でRe数が大きくなると支配的となるが、次式により求まる。

$$\frac{h_w^* D_p}{k_F} = C Pr^{1/3} \cdot Re_p^{-1/2} \quad (52)$$

定数Cは、液体系の実測値解析結果より2.6が推奨されている。

k_{ew}^0 は流れのない場合の壁近傍有効熱伝導率で、国井・Smithの理論式(37)と類似の次式により推算される(但し、輻射伝熱の効果を無視する)。

$$\frac{k_{ew}^0}{k_F} = \epsilon_w + \frac{1 - \epsilon_w}{\phi_w + \frac{2}{3} \left(\frac{k_F}{k_s} \right)} \quad (53)$$

ここに ϵ_w は壁近傍の平均ポロシティで球状充填物ではおおよそ0.7程度の値を与えればよ

い。また、 ϕ_w は流体有効厚さと粒子径 D_p との比であり、(41)式と同様な方法で求められ次式で表される。

$$\phi_w = \frac{1}{2} \frac{\{(\kappa-1)/\kappa\}^2}{\ln \kappa - (\kappa-1)/\kappa} - \frac{2}{3} \left(\frac{1}{\kappa}\right), \quad \kappa = \frac{k_s}{k_f} \quad (54)$$

2.4.4 閉塞領域内熱伝達（閉塞物—冷却材）

粒子径が D_p である1個の球が流体に対して相対速度 u_0 を持っている場合、流体と粒子間の熱伝達係数 h_p は以下に示すランズ・マーシャルの式で表される[22]。

$$\frac{h_p D_p}{k_f} = 2.0 + 0.6 Pr^{1/3} \left(\frac{D_p \rho u_0}{\mu} \right)^{1/2} \quad (55)$$

直径 D_p の球が最密充填をなしている固定層については、見かけの流速（粒子の存在しない空管としての流速）を v_0 とすると開口率から $u_0 = 10.73v_0$ となるが、よりまばらな一般の固定層として10.73の代わりに9とおけば、(55)式は u_0 と v_0 を置き換えて係数0.6は1.8となる[22]。若尾らは1.45を提唱している（但し、 $Re_p = 0.03 \sim 100$ 条件下）[23]。ASFRE-IIIコードで評価される閉塞領域内の流速は、ポロシティやpermeabilityを加味したものではあるが、閉塞物粒子との相対速度を厳密に再現しているものではない。そこで v_0 の値として Superficial velocity v （ASFREで計算された閉塞内流速 \times ポロシティ）を適用し、暫定的に係数1.8を使用する。

2.4.5 閉塞領域内熱伝達（被覆管またはラッパ—管—閉塞物）

固体—固体間の熱伝達は次式で表される。

$$q_{bw}'' = h_b (T_w - T_b) \quad (56)$$

ここで h_b は被覆管（またはラッパ—管）表面における閉塞物の熱伝達率であり、ASFRE-IIIコードでは入力で指定する。

h_b は例えば金属面接触の接触熱抵抗の逆数として与えることができる。一般に接触熱抵抗は、微視的接触点における伝導、隙間空間に存在する流体層中の伝導と対流、接触面間の輻射などに依存するが、このうち対流と輻射の寄与は通常無視され、

$$\frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_m} \quad (57)$$

と表される[24]。ここで R_M は固体部分の熱伝導、 R_m は隙間空間部分の熱伝導である。それぞれの具体的な式は、Laming[25]やProbertら[26],[27]により整理されているものがあるが、汎用的ではない。

2.5 平板閉塞の取り扱い

平板閉塞（厚みもポロシテイも無い板を仮定）の解析を行う場合には、入力データである閉塞物ポロシテイに0を設定すればよい。この時閉塞物は圧力損失無限大の領域とみなされるだけで、上述のモデルにあるような閉塞物内の流動や温度計算はなされない。

表2-1 種々の粒子の形状係数 ϕ_c (Carmanの形状係数)

Arnoldの針金らせん	0.2
くら	0.3
雲母 (薄辺状のもの)	0.28
Fusain Fiber (一種の繊維)	0.38
ガラス破砕物	0.65
粉炭 (天然のもの)	0.65
微粉炭 (粉砕したもの)	0.73
煙道塵 (融解して集塊となったもの)	0.55
煙道塵 (融解して球状となったもの)	0.89
砂 (平均)	0.75
砂 (角ばったもの)	0.73
砂 (丸みを帯びたもの)	0.82

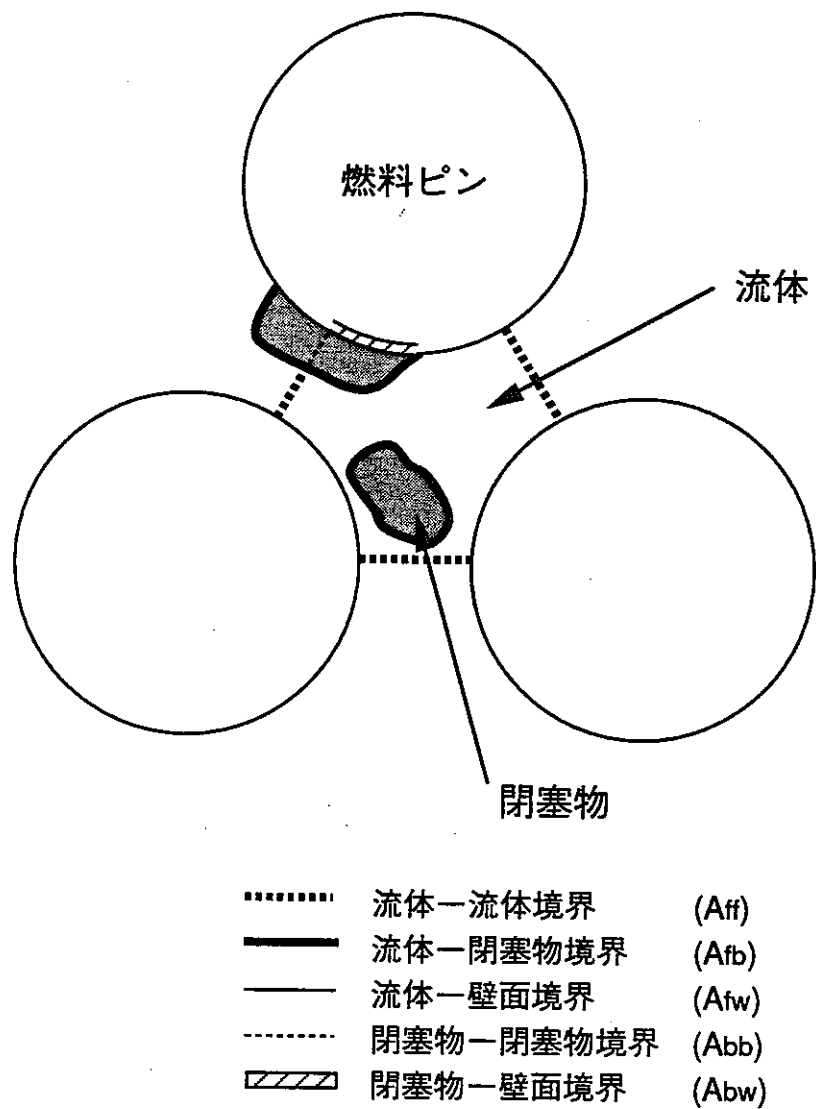


図 2-1 閉塞サブチャンネルの横方向断面

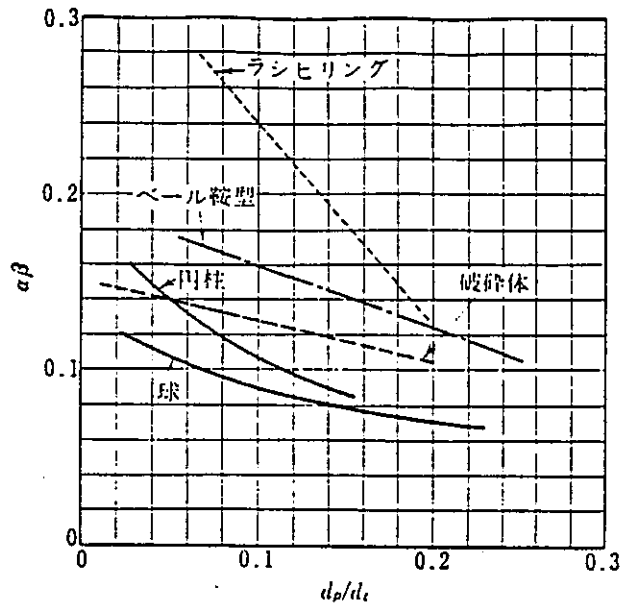
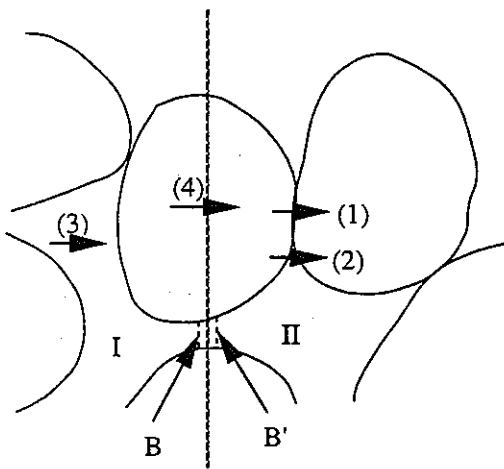


図 2-2 混合拡散パラメータ $\alpha\beta$ と無次元粒径の関係
(文献22より)



- (1) 粒子から粒子への熱伝達 (接触熱伝達)
- (2) 接触点付近の薄い流体膜を通ずる伝導伝熱
- (3) 固体表面から固体表面への放射伝熱
- (4) 固体内熱伝導
- (5) 空隙中の流体熱伝導
- (6) 空隙Iから空隙IIへの放射伝熱 (BとB'間)

図 2-3 粉粒体固定層における伝熱モデル

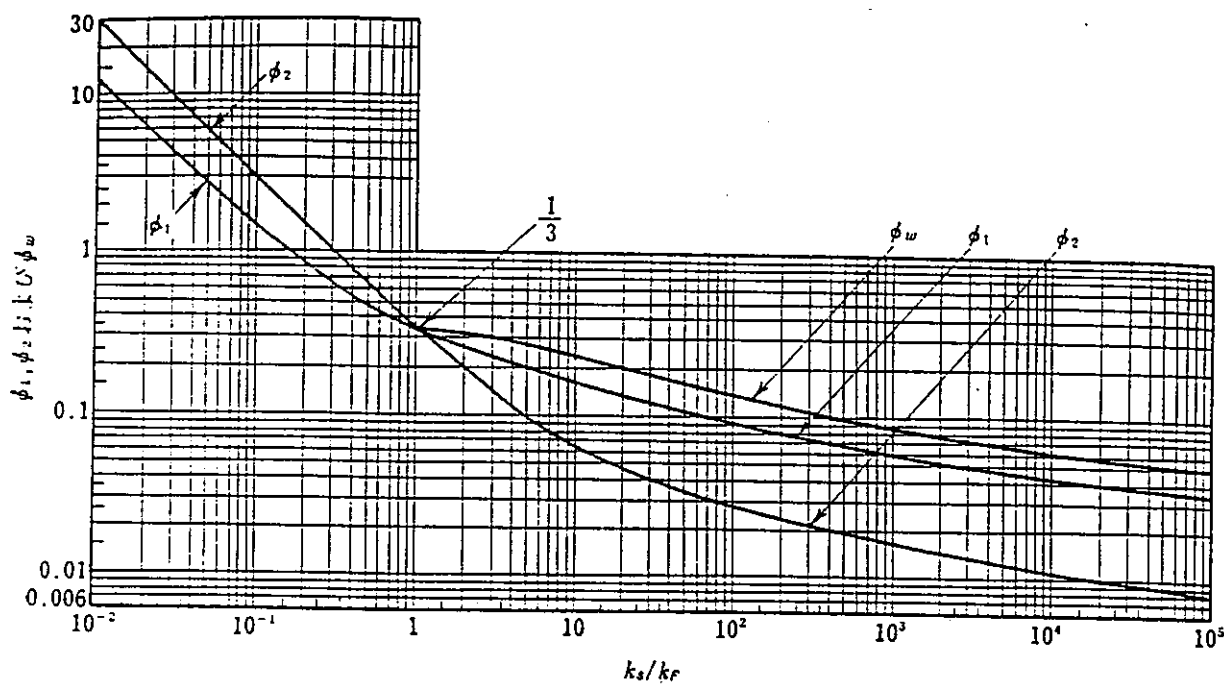


図 2-4 ϕ と k_s/k_F の関係 (文献22より)

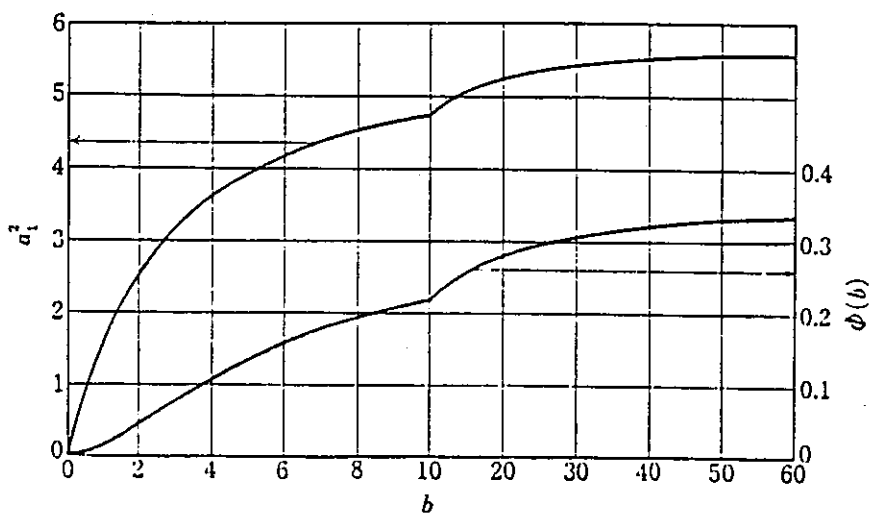


図 2-5 a_1^2 と $\phi(b)$ の関係

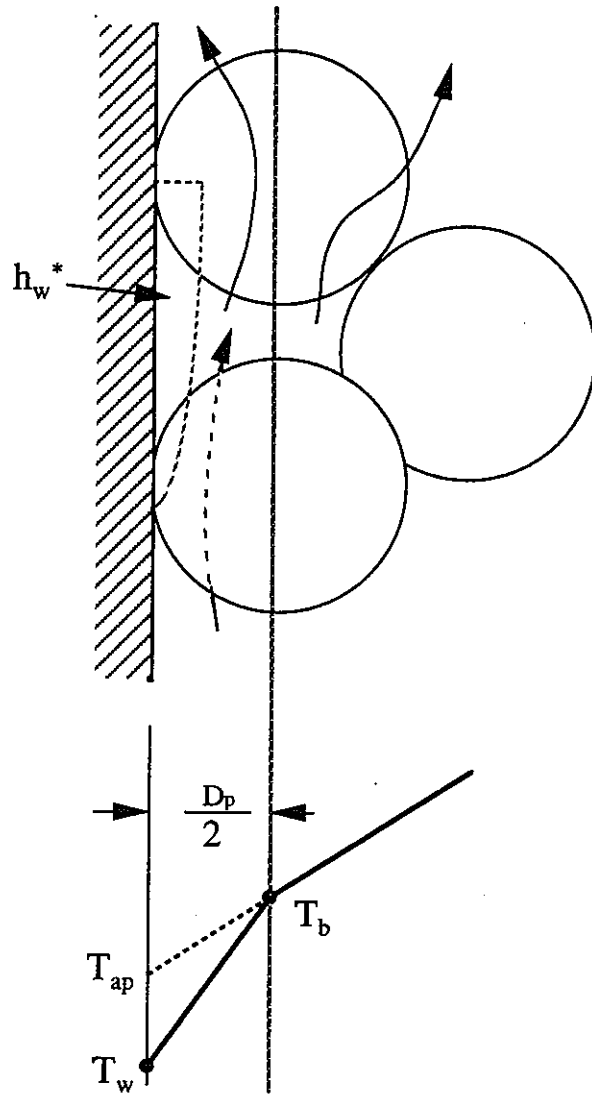


図 2-6 固定層の管壁における流れと伝熱の状態

3. 検証解析

前節に示したポーラス状流路閉塞モデルの妥当性を検討するため、フランス（EDF）で行われたポーラス状閉塞ナトリウム炉外試験Scarlet 2⁽²⁸⁾の結果を用いて、ASFRE-IIIコードの検証解析を行った。

3.1 Scarlet-2試験の概要

Scarlet 2は、ワイヤースペーサ型燃料集合体において、より現実的な閉塞形態と考えられるポーラス状閉塞に対して熱流動的影響を把握することを目的として行われたナトリウム炉外試験である。（ちなみに、先に行われたScarlet 1では中心6サブチャンネル平板閉塞を仮定したが、大きな温度上昇は見られなかった。）

試験体断面図を図3-1に示す。試験体は、Super-Phenixの燃料集合体形状を模擬した19本ピンバンドル体系であり、中心6サブチャンネルには厚みのあるポーラス状閉塞が設置されている。流路断面の最外周は、隣接燃料ピンの形状を模擬するような局面を持たせてある。

試験体のスペックは次のとおりである。

ヒーターピン直径：	8.50 mm
ピン配列ピッチ：	9.79 mm
スペーサワイヤー直径：	1.25 mm
ワイヤー巻きピッチ：	180 mm
発熱長：	1.0 m
ピン1本あたりの発熱量：	44.8 kW（一様発熱）
被覆管材質：	SUS 316

また、設置したポーラス状閉塞のスペックは、

閉塞物物質：	チタニウム焼結粒子
粒子直径：	0.5 mm
ポロシティ：	0.35
閉塞物長さ：	600 mm
閉塞物位置：	発熱部下端から587 mm～647 mm

である。試験はいくつかの電気出力と冷却材流量を組み合わせて行われたが、いずれも閉塞領域内の中心ヒーターピン付近で最高温度が計測されており、無次元温度に換算すると低流量条件時を除いてほぼ一定値となった。例えば、冷却材流量を3.3 kg/sec、総電気出力850 kWとした試験条件では、閉塞領域内において平均バルク温度に対して約300℃の温度

上昇が計測されている。

3.2 解析条件

解析は、冷却材流量3.3 kg/sec、総電気出力850 kWとした試験を対象とした。解析に使用した径方向サブチャンネルメッシュ分割図を図3-2に、軸方向メッシュ分割図を図3-3に示す。軸方向に関しては、閉塞部のメッシュサイズが10mmの等間隔になるように、またワイヤースペーサモデル（分布抵抗モデル）からの制限より、最大メッシュサイズをワイヤー巻きピッチの1/12である15 mmとしている。軸方向メッシュ分割テーブルを表3-1に示す。計算では発熱部の上下にワイヤースペーサ1巻きピッチ分（18 cm）の非発熱領域を設けている。

閉塞領域については、3.1節で示した形状、粒子径など閉塞物のスペックをそのまま入力としている。閉塞物熱伝導率には、チタンの物性値である20.0 W/mKを用いた。境界条件および計算条件（選択したオプション）は以下のとおり。

境界条件

集合体入口流入：	流量境界条件（3.3 kg/sec）
集合体入口冷却材温度：	246 ℃
集合体出口圧力：	一定
ラッパー管壁：	断熱

選択した計算オプション

ワイヤースペーサによる圧力損失：	分布抵抗モデル
熱伝達相関式：	FFTF相関式
閉塞領域圧力損失相関式：	Ergunの式

図3-1に示されるように、試験体の最外周の流路形状は通常のリッパ管壁（平板）ではなく、隣接燃料ピン形状を模擬した円弧が付加された形となっている。ASFRE-IIIコードにおいては、このような形状の模擬を直接はできないため、流路断面積が等価となるように最外周流路にポロシティ等を導入した。

なお、計算時間の観点から燃料部等の構造材温度計算は除外した。また閉塞物自身の温度についても、不確定な入力データが必要となること、定常計算においては流体温度とほとんど同じになることを考慮して、計算時間短縮のため計算を除外した。ここで適用する工学モデルのいくつかのパラメータの選定については、付録4に別途示す。

3.3 解析結果および考察

図3-4に示す位置での集合体軸方向断面における流速場および温度場を図3-5に示す。こ

ここに示される流速ベクトルは、サブチャンネル間ギャップ位置で定義される横方向流速とサブチャンネル中心で定義される軸方向流速を合成し、ギャップ位置で表示したものである。但し、横方向の流速は軸方向流速に比較して小さいため、強調する意味で10倍にして表示してある。また、メッシュ分割に対応して流速ベクトルを表示しているため、軸方向分割間隔が小さいところではベクトルは密に詰まって表示されている。

流速場については、集合体入口から閉塞部手前までの領域では、ワイヤースペーサの効果によりクロスフローが周期的に強まり、模擬燃料ピンに対し螺旋状の流れが形成されている。閉塞領域近傍では、閉塞物内の圧力損失が大きいため冷却材の大部分は閉塞物の周囲の流路を流れ、閉塞物後流で再び合流していることがわかる。温度場については、下流方向に進むにつれて冷却材温度が上昇していき、閉塞物領域内および発熱上端部中央付近に温度ピークが発生する。冷却材最高温度は、この解析ケースの場合、閉塞物内に発生するピーク温度となる（もちろん閉塞形態によっては、発熱上端部の場合もある）。等温線の形状をみると、燃料集合体中心軸に対して必ずしも対称にはなっていない。これはワイヤースペーサにより発生するクロスフローの影響であり、特に閉塞物後流領域では左右の流れの合流効果も加わりその傾向が強まる。また、集合体中心部に比べて周辺部の温度が低くなるのは周辺部を通過する流量比率が相対的に大きいためである。

閉塞物近傍の流速場拡大図を図3-6に示す。閉塞領域を越えた後、正常バンドル体系と同等の流速分布に回復するのは閉塞物上端より約10 cm後流側となっている。このwake領域内には渦の発生は見られない。計算精度的には、サブチャンネル解析手法においては軸方向メッシュ分割を細かくできても径方向メッシュ分割スケールが1サブチャンネルそのものであり、設定された閉塞物（中心6サブチャンネル閉塞）の横幅に比べてかなり粗いこと、また対流項の差分精度が1次であることから、wake領域の大きさや渦の発生は必ずしも厳密に再現されているわけではない。しかしながら、現象的には閉塞物全周からの合流であること（周辺閉塞では流動場は堰を乗り越える流れに類似しており閉塞物直後に渦が発生し易い）、閉塞物そのものを通過する流れも存在することから、仮に逆流が発生するとしてもかなり小さいものであると予想される。「もんじゅ」の安全評価で仮定された平板（厚みがなく冷却材は閉塞物内を通過できない）閉塞においては、このwake領域の中に冷却材ピーク温度が発生するためその再現性が大きな問題となるが、ポラス状閉塞の場合、閉塞物内で冷却材ピーク温度が形成されるため、wakeよりもむしろ閉塞領域の流動の影響が相対的に大きい。但し、軸方向に垂直な断面における流路閉塞割合が大きくなる場合（例えば中心24サブチャンネル閉塞）、あるいは閉塞領域がラッパー管に隣接する周辺閉塞の場合（流動場は堰を乗り越える流れに類似する）には、このwake内の逆流成分が閉塞領域を通過して流出してくる冷却材流量に影響を与えるため閉塞領域内ピーク温度を変動させる可能性がある(29)。（直接の影響は詳細試験あるいは解析を待たなければならない。） 閉塞領域内については、流速はかなり遅くなっており、また、閉塞物の下端から中心付近までは周辺流路に抜ける流れが、中心から上端にかけては流入してくる流れが

見られる。温度分布は、閉塞物内で急激に温度ピークが立ち上がっているが、後流側では渦の発生がないため、特に局所的なピークは見られない。

閉塞物を含む各サブチャンネル（サブチャンネル番号：17, 18, 22, 23, 27, 28、図3-2参照）の軸方向流速分布を図3-7に、軸方向温度分布を図3-8に示す。閉塞領域上流側で急速に軸方向流速成分は小さくなり、閉塞物内部では極低流速となる。閉塞部中心からやや下流側で流速が最小となり、閉塞部を通過する直前に幾分増加傾向が見られる。これは図3-7でわかるように、閉塞部周囲から流れ込みが発生するためである。閉塞領域後流では流速が再び回復していくが、ワイヤスペーサの影響でサブチャンネルによって回復の仕方が異なる。温度分布については、閉塞領域での流速の低下にあわせて温度が上昇し、流速最小値近傍でそのピークが発生している。閉塞領域内に流れが存在するため、熱伝導支配（流れが停留）に比べてピーク位置が下流側にシフトしているとも解釈できる。サブチャンネルごとにピークの発生位置やピーク温度が異なるのは、やはりワイヤスペーサの影響である（クロスフロー成分によるだけでなく、コントロール・ボリューム（C.V.）に占めるワイヤスペーサの割合の違いもあり、これが各C.V.を通過する流量に差異を生じさせている）。

図3-9には実験で計測された軸方向温度分布と解析結果の比較を示す。実験における計測がどのサブチャンネルでなされたものかは不明なため、解析結果は最もピーク温度の高かったサブチャンネル（I=18）の値を示してある。実験でのピーク温度が649℃であるのに対して、解析では651℃と予測した。今回導入したポーラス状閉塞モデルはマクロ的な工学モデルであること、サブチャンネル解析手法のメッシュ規程の限界を考慮すると、比較的良好に実験で得られた温度プロファイルを再現していると言える。

今回の実験との比較解析は、「機能検証」に近い意味あいを持つ。ポーラス状閉塞の実験自体にも、製作誤差（例えば閉塞物と模擬燃料ピンの隙間の不均一さ）による温度分布の偏りが発生したり、閉塞領域内の「冷却材」の温度計測が難しいなど、理想的な条件でのデータの取得が必ずしも容易ではない。また、閉塞領域1サブチャンネル内にも径方向温度分布がつく可能性があるため、平均量導出のための手続きも必要となる。これらの理由から、厳密な意味での検証にはさらに詳細な実験データ（解析で必要とする境界条件を明確に押さえることも不可欠）、もしくはマイクロモデルを用いた詳細解析による検証データの取得が望まれる。

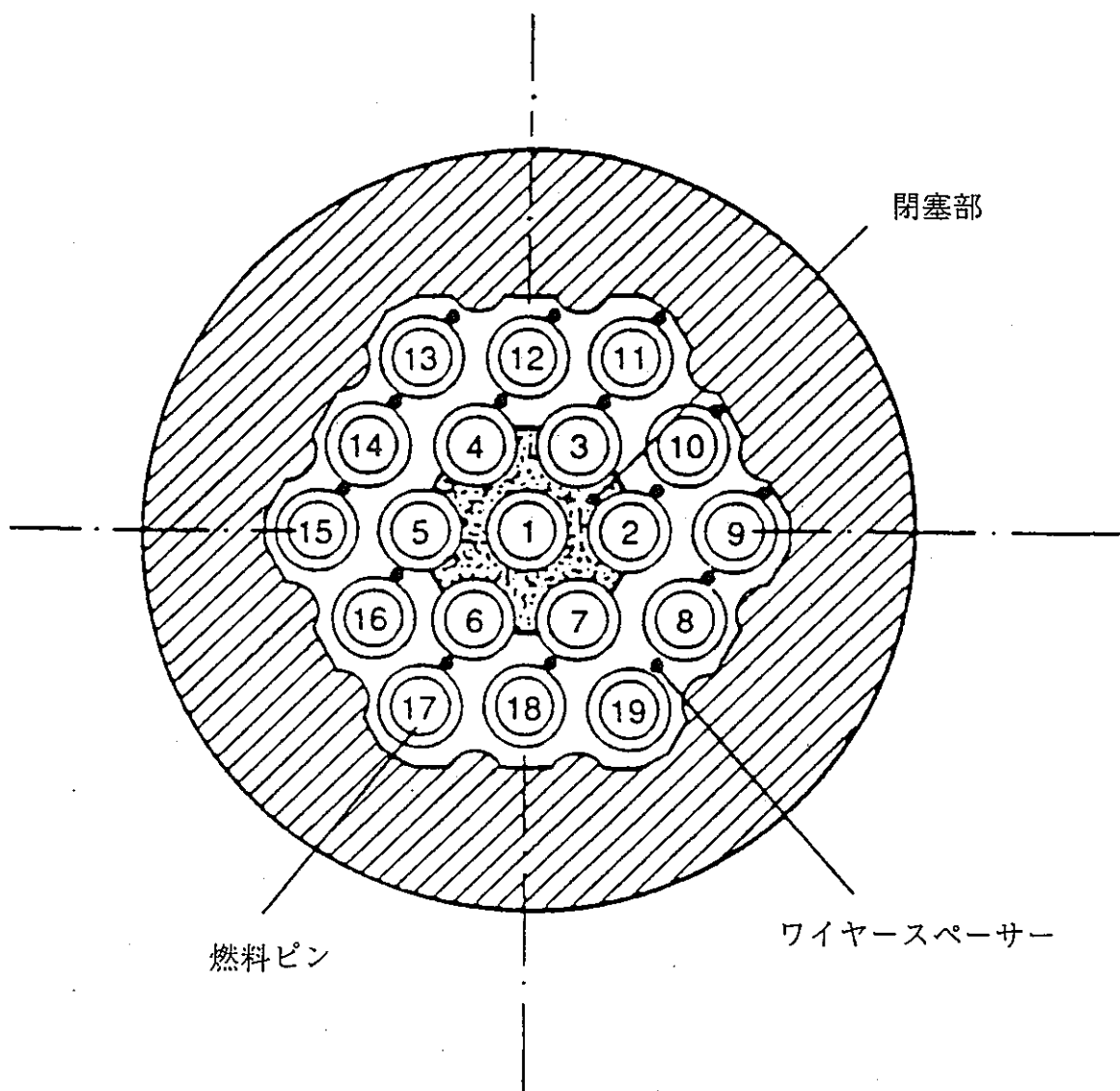


図 3 - 1 Scarlet-2 試験体断面図

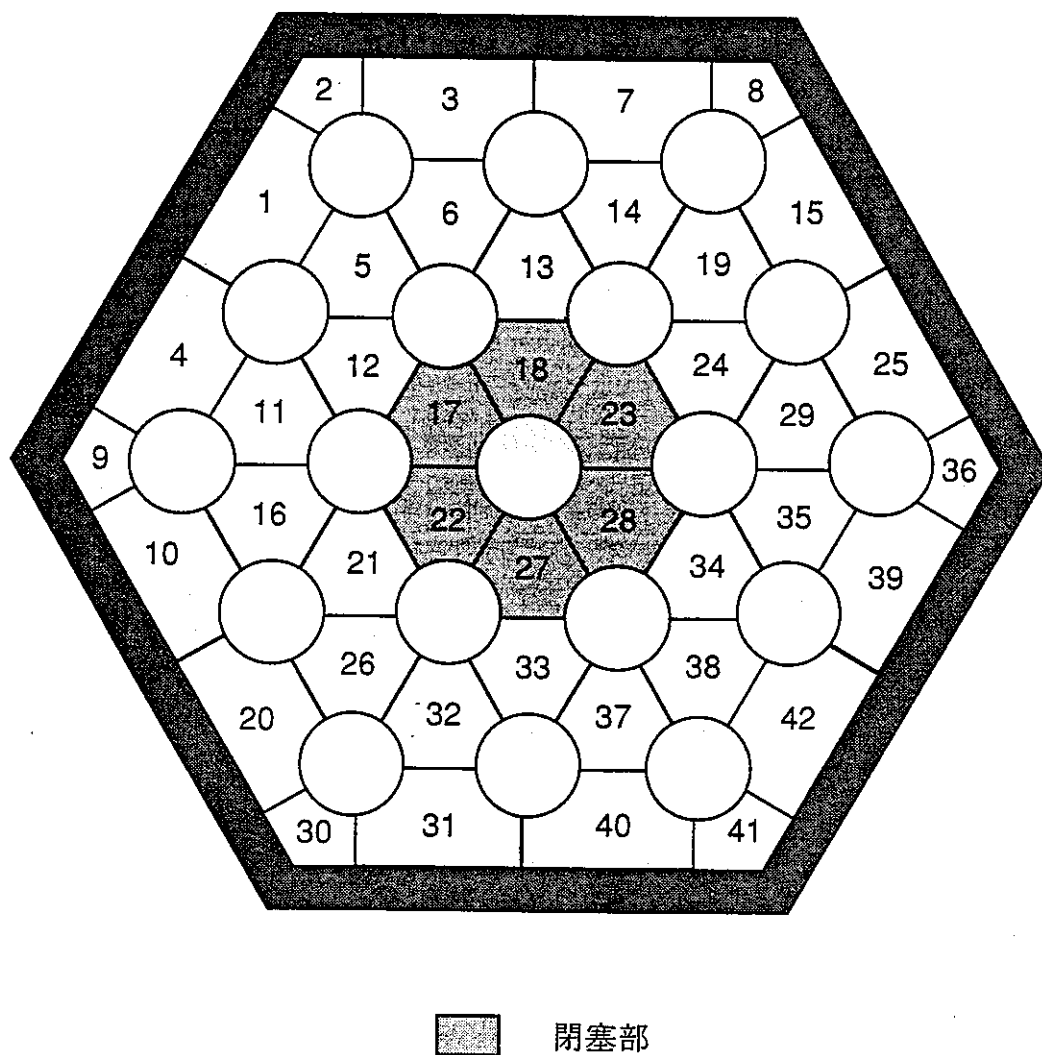


図3-2 サブチャンネル分割及び閉塞部配置図

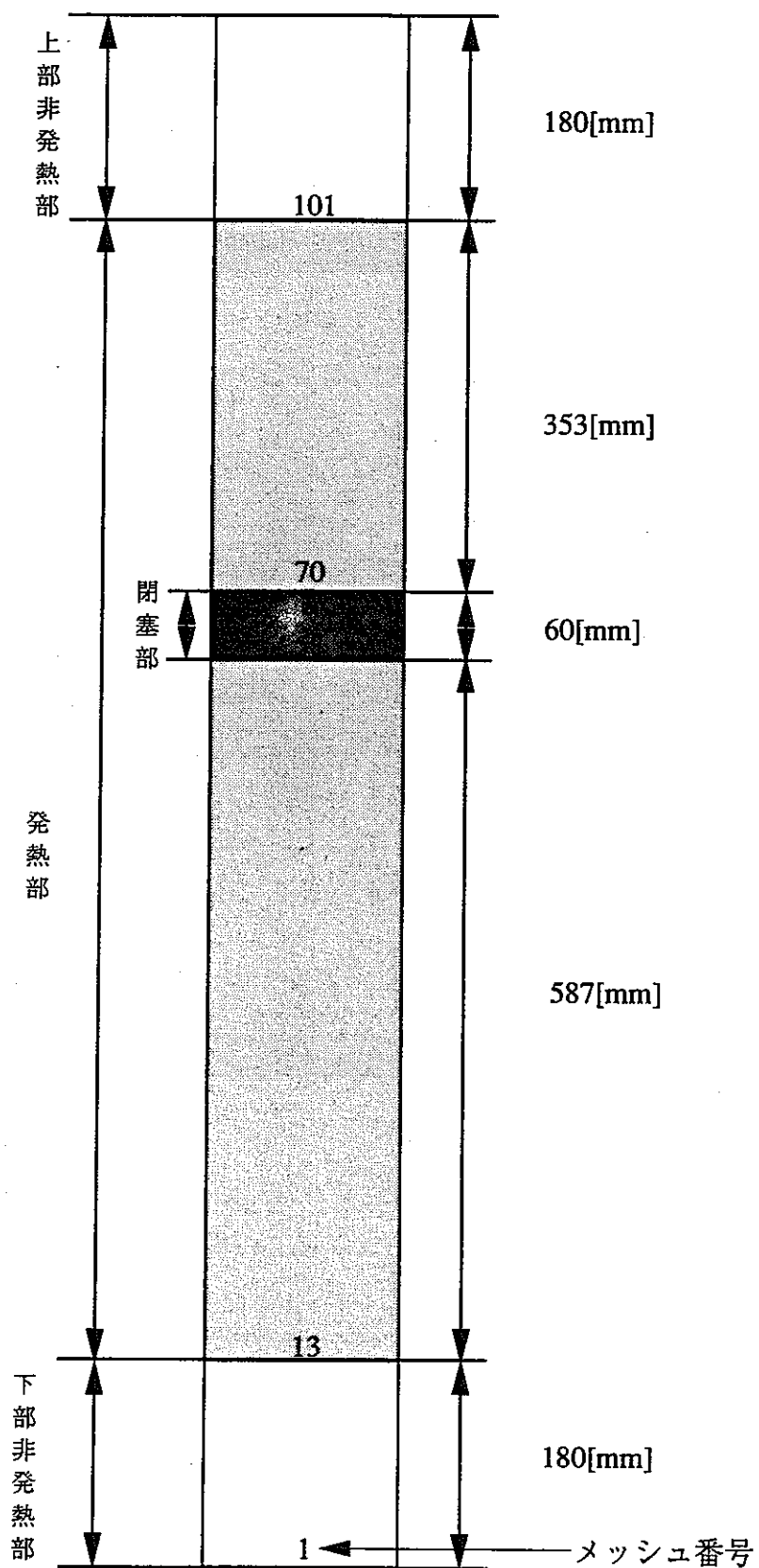
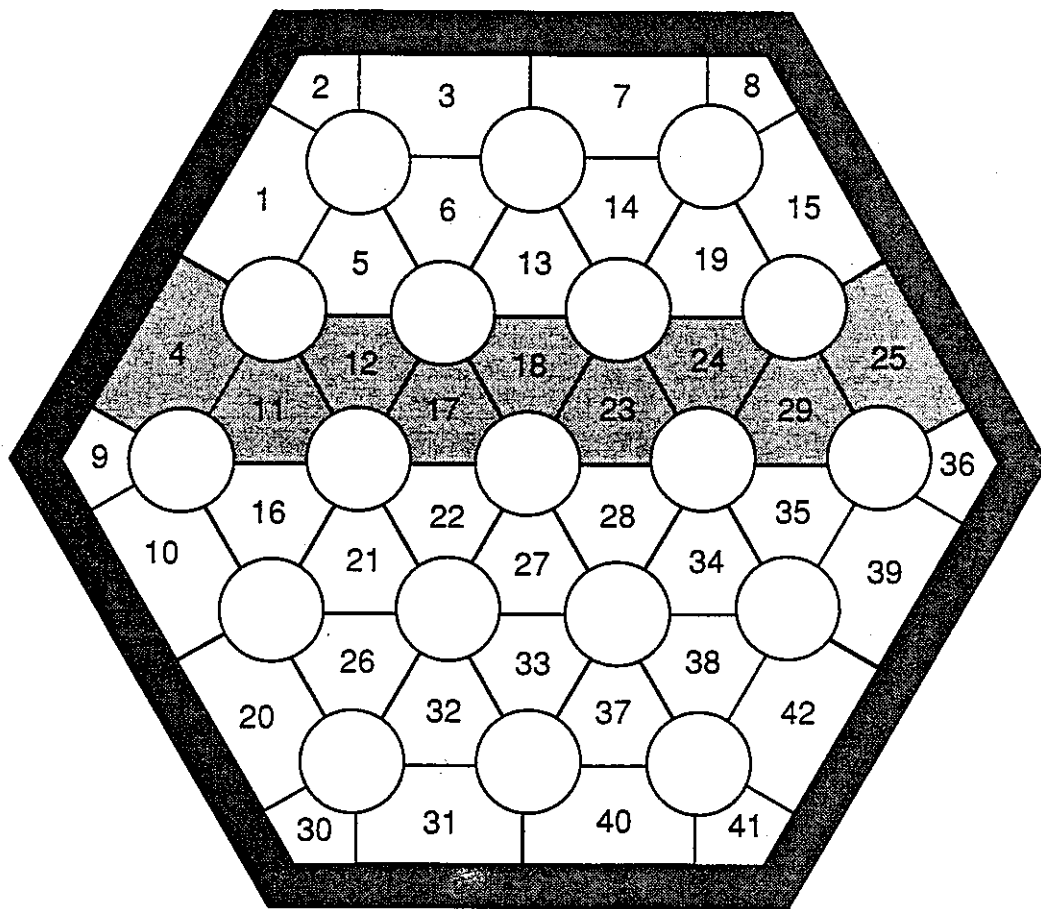


図 3-3 軸方向メッシュ分割図




 データ参照位置

図 3-4 流速及び温度の参照断面

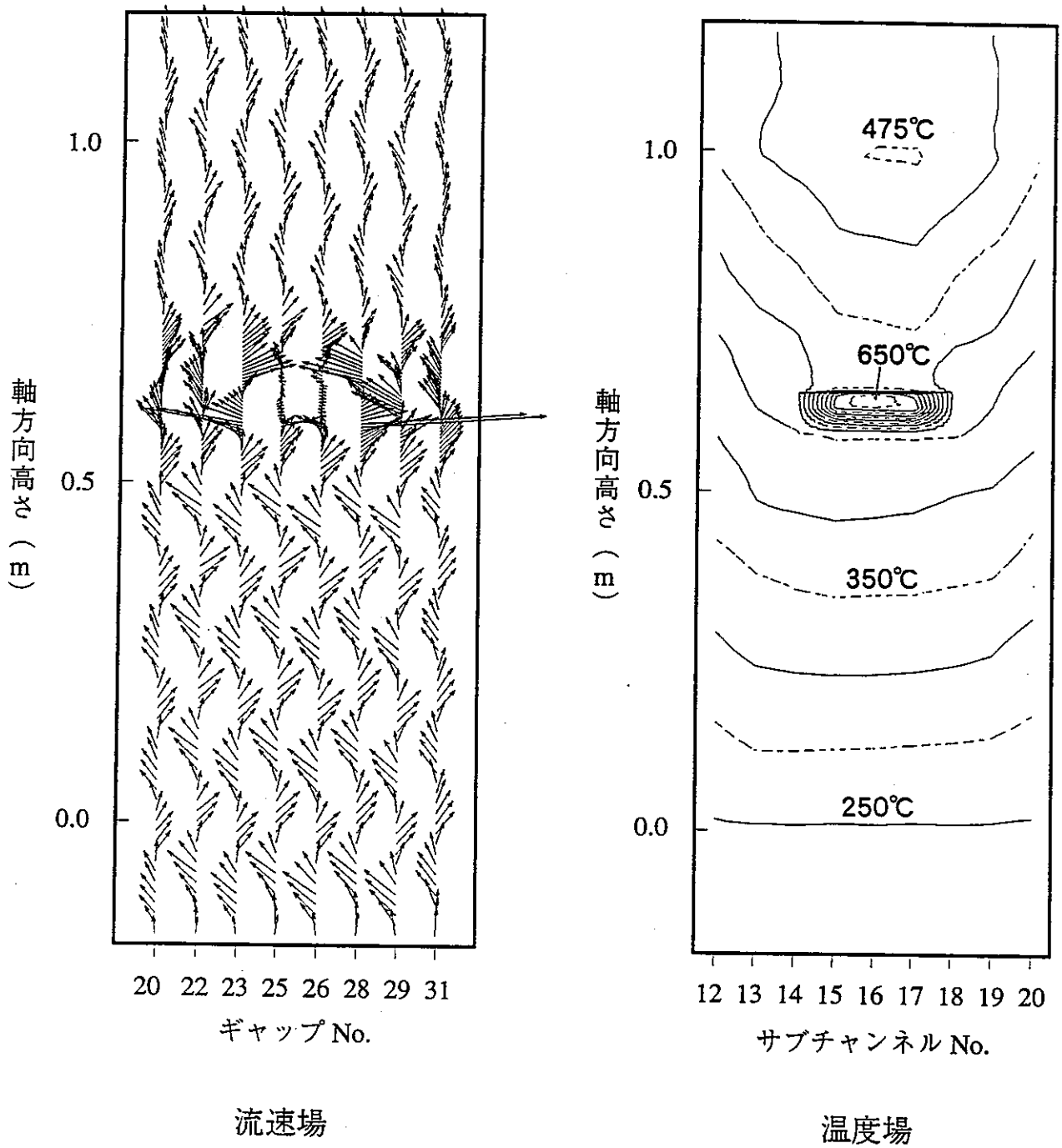


図3-5 軸方向断面内流速場及び温度場

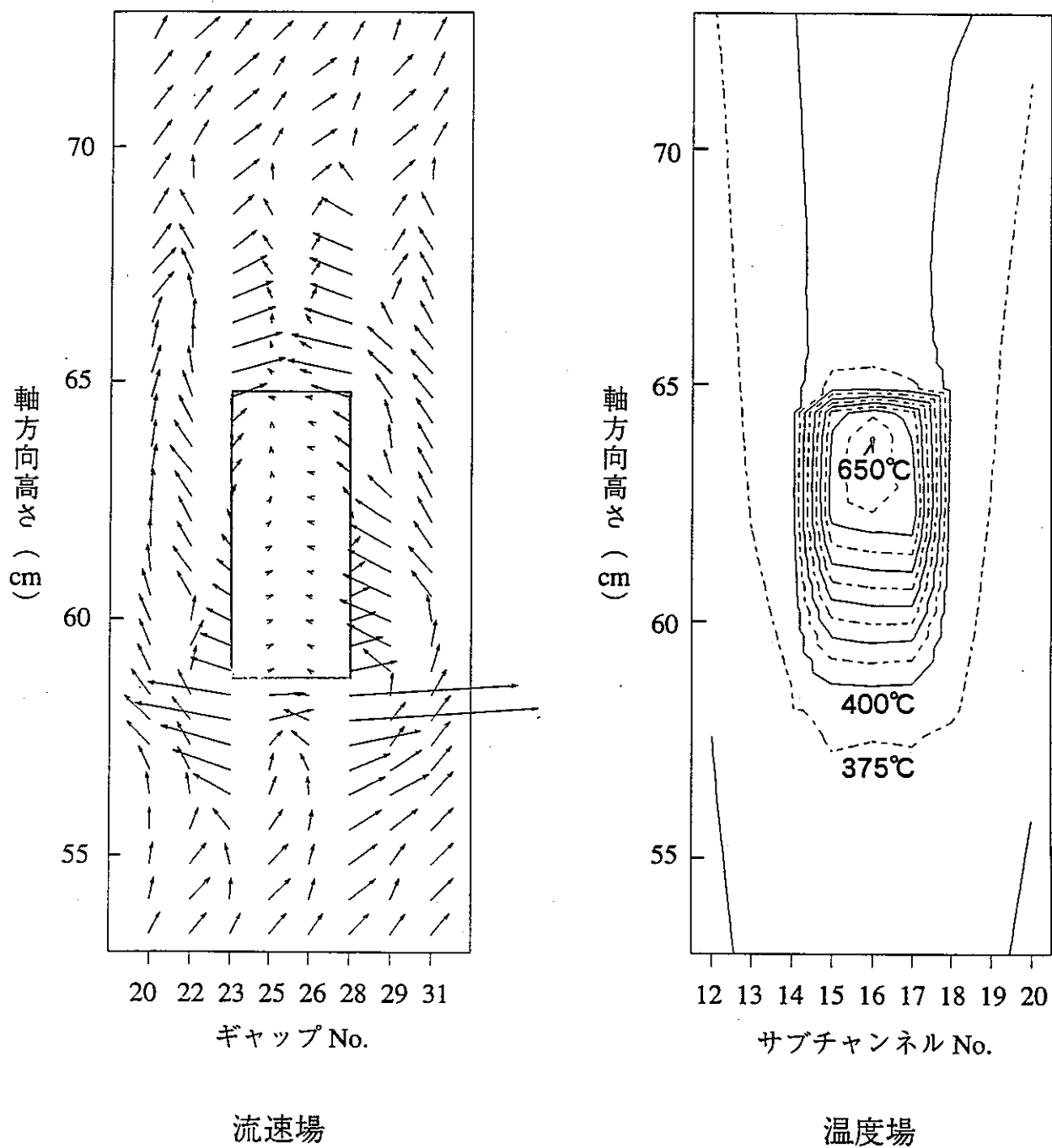


図3-6 軸方向断面内閉塞領域近傍流速場及び温度場拡大図

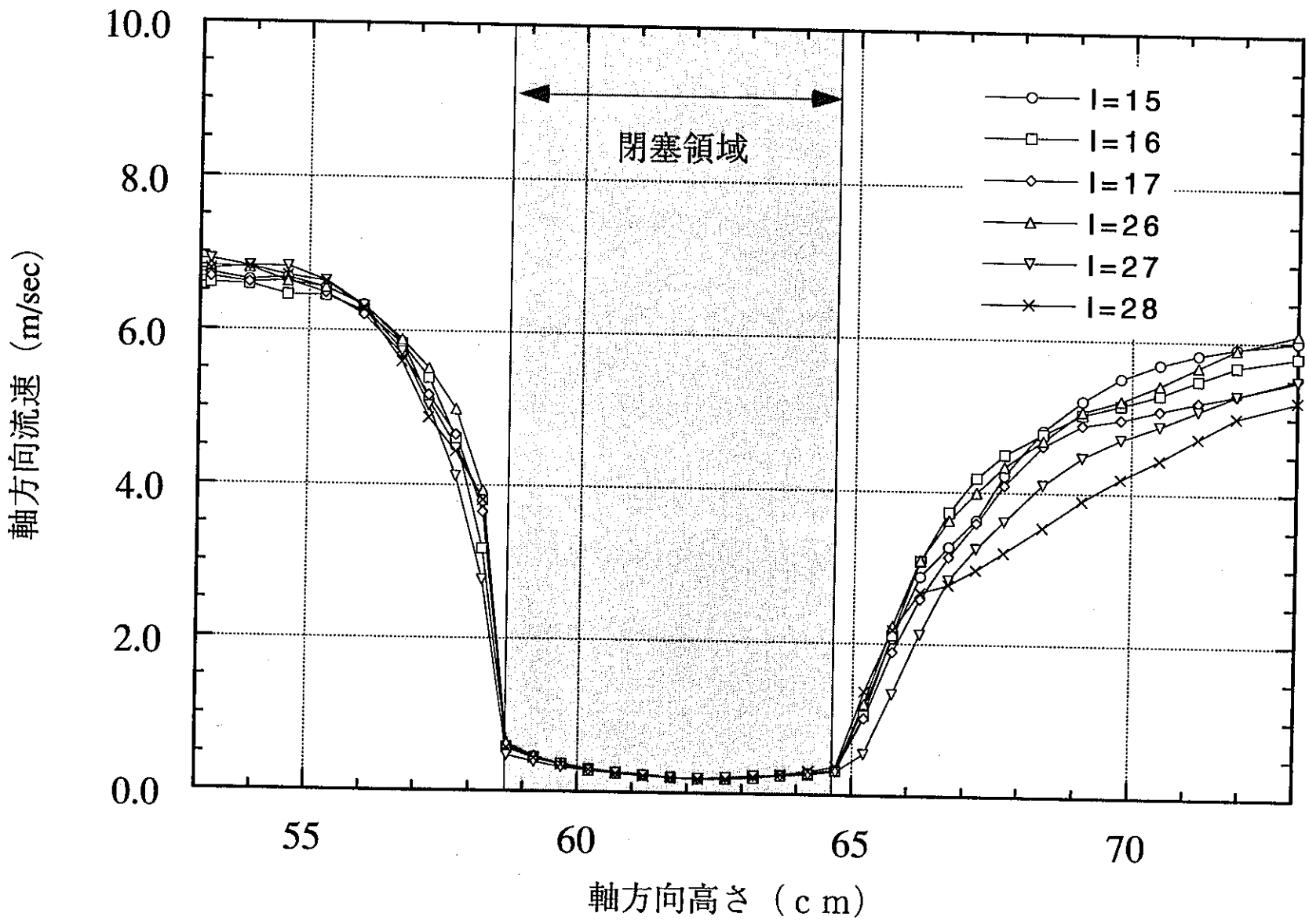


図3-7 冷却材軸方向流速分布

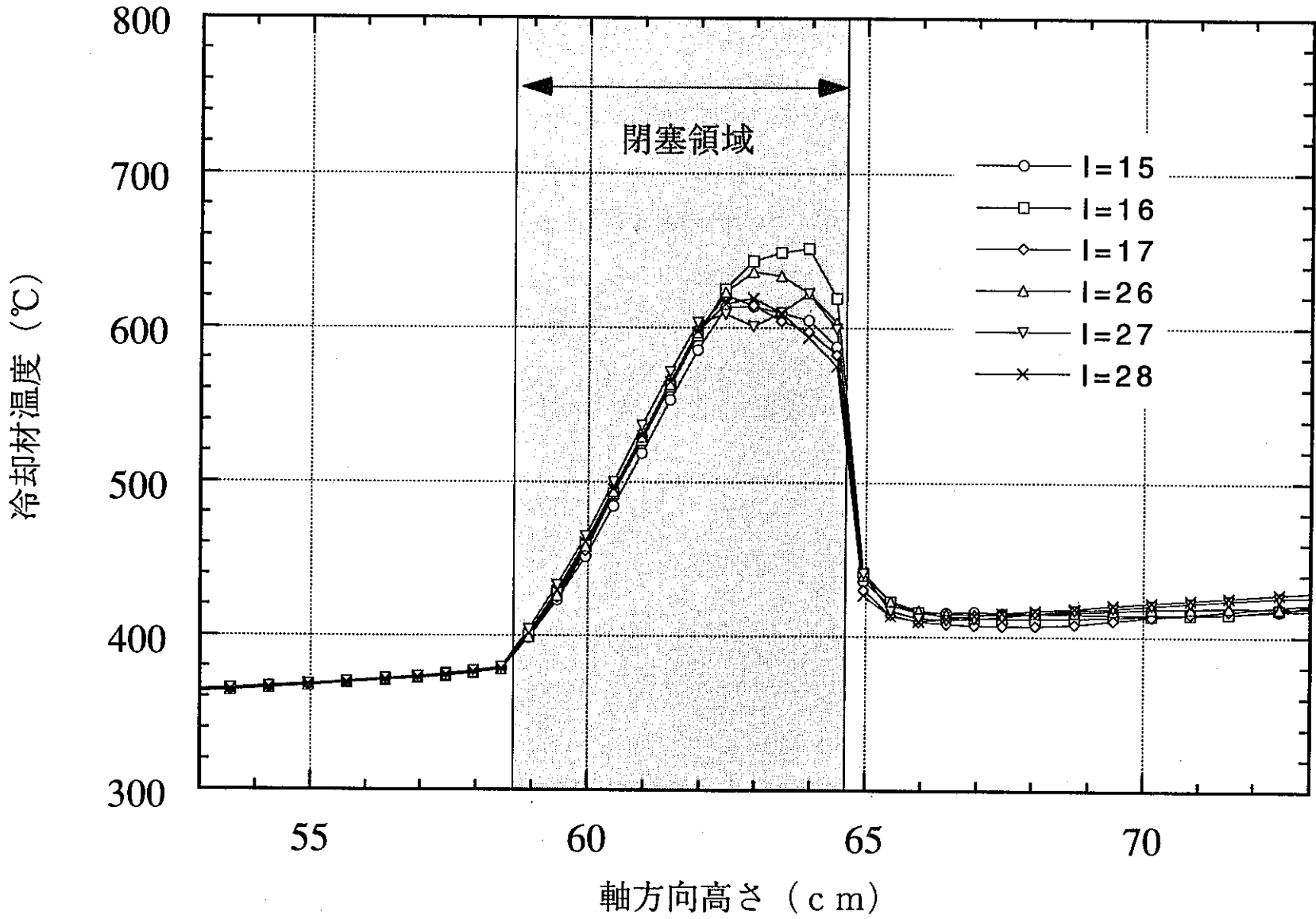


図3-8 冷却材軸方向温度分布

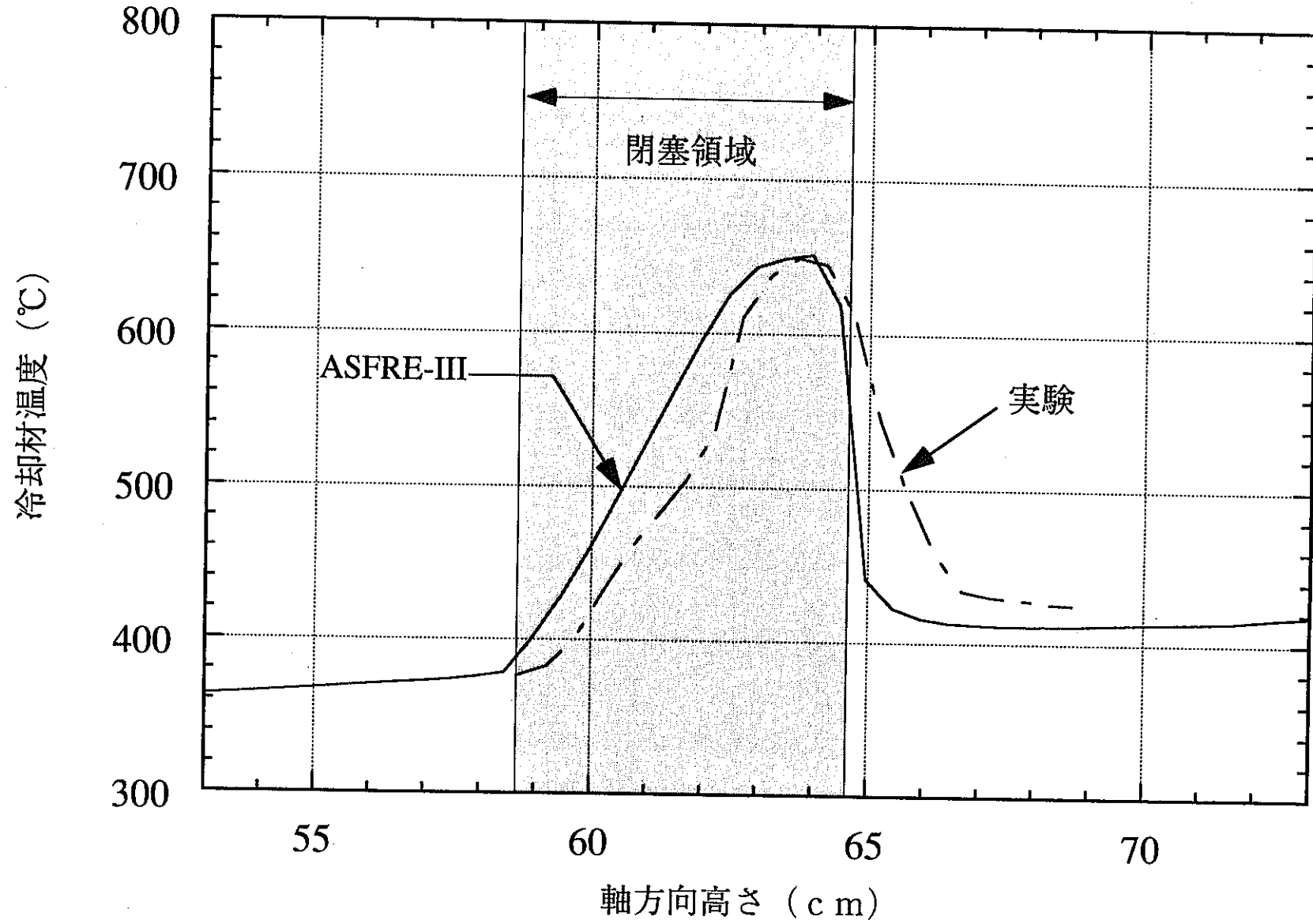


図3-9 冷却材軸方向温度分布に関する
実験データと解析との比較

4. ま と め

高速炉の燃料集合体内局所閉塞事象評価に対して、熱流動評価ツールを提供することを目的として、単相サブチャンネル解析コードASFRE-IIIの解析機能の拡張を行った。

ここでは、昨年度開発したポーラス状流路閉塞モデル（ポーラスボディアプローチの手法を用いて定式化した閉塞物のエネルギー式と冷却材の各保存式を結合して解く）の汎用化および精度向上を図るため、暫定として組み込まれていた閉塞領域内圧力損失や熱伝導に関する相関式に代えて、より詳細なモデルを組み込んだ。また、本モデルの適用性を確認するため、フランスで実施されたScarlet-2試験（37本ピンバンドル体系中心6サブチャンネル閉塞条件）のデータを用いて機能検証解析を行い、計算結果の妥当性と計算の安定性を確認した。

サブチャンネル解析手法の特徴上、本モデルは1閉塞サブチャンネル内径方向温度分布を1点で近似している。1つの閉塞サブチャンネル内に無視できない径方向温度分布が存在する場合には、その平均値を評価する本モデルに対して、詳細実験や詳細解析などにより得られるファクターを用いて保守側評価を行う、あるいは本モデルのパラメータを調整し直接保守側評価値を得るなどの方法を別途検討する必要がある。

本モデルは様々なポーラス状閉塞形態を模擬できる反面、ポーラス状閉塞物を規定するモデルパラメータの数も多い、本格的なモデル検証は、今後動燃で予定されている水／ナトリウム炉外試験の結果を待ち、実施する予定である。

5. 参考文献

- (1) K. Schleisiek, "Risk Orientated Analysis of Subassembly Accidents," Proc. of the Int. Top. Mtg. on Fast Reactor Safety, Knoxville, p141, April 1985.
- (2) G. J. Vaughan, "Event Tree Analysis of the Sub-Assembly Accident," Science and Technology of Fast Reactor Safety, Guernsey, May 1986.
- (3) K. Haga, K. Yamaguchi and H. Namekawa, "Review and Future Needs of Experimental Studies on Local Faults," Science and Technology of Fast Reactor Safety, Guernsey, May 1986.
- (4) K. Yamaguchi, H. Nakamura and K. Haga, "Boiling and Dryout Conditions in Distributed Cluster Geometry and Their Application to the Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Local Fault Assessment," Nucl. Sci. and Eng., 88, p464, 1984.
- (5) G. L. Fiorini, J. Rion and R. Vidil, "The ABACUS Program: Experimental Study of Phenomenology Involving Subassembly Blockage: Computer Codes," Proc. of the LMFBR Safety Topical Mtg., Lyon, vol. IV, p239, July 1982.
- (6) C. von Minden and G. F. Shultheiss, "Upon Local Blockage Formations in LMFBR Fuel Rod Bundles with Wire-Wrapped Spacers," 10th Liquid Metal Boiling Working Group (LMBWG) Mtg., October 1982.
- (7) F. Huber and W. Peppler, "Influence of Size and Porosity of a Blockage in a Bundle Geometry on the Flow and Temperature Distribution in the Wake," 10th Liquid Metal Boiling Working Group (LMBWG) Mtg., October 1982.
- (8) K. Koyama et al., "Study on Local Blockage in FBR Fuel Assembly," Proc. of Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, 1991.
- (9) H. Ninokata et al., "ASFRE-III: A Computer Program for Triangular Rod Array Thermohydraulic Analysis of Fast Breeder Reactors," PNC N941 85-106, July 1985.
- (10) H. Ninokata et al., "Distributed Resistance Modeling of Wire-Wrapped Rod Bundles," Nucl. Engng. and Design, 104, pp. 93-102, 1987
- (11) J. C. Slattery, "Momentum, Energy and Mass Transfer in Continua," McGraw-Hill, 1972.
- (12) 例えば、豊倉 富太郎、他、「流体力学」、実教出版など。
- (13) P. C. Carman, Trans. Inst. Chem. Engrs., London, 15, p150, 1937.
- (14) S. Ergun, "Fluid Flow Through Packed Columns," Chem. Eng. Progress Vol. 48, 2, p89, 1952.
- (15) P. Forchheimer, "Wasserbewegung durch Boden," Zeitschrift. Verein Deutscher Ingenieure, Vol. 45, pp. 1782-1788, 1901.
- (16) I. F. Macdonald, et al., "Flow Through Porous Media - The Ergun's Equation Revisited," Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 18, No.3, pp.199-208, 1979.
- (17) 矢木 栄、国井 大蔵、化学工学、17, p576, 1954。

- (18) D. Kunii, et al., "Studies on Heat Transfer Near Wall Surface in Packed Beds," A.I.Ch.E. Journal, Vol.6, No.1 pp.97-104, 1960.
- (19) 国井 大蔵、「化学工学要論」、養賢堂、1973。
- (20) S. Yagi and D. Kunii, "Studies on Heat Transfer in Packed Beds," Int. Development in Heat Trans., Part IV, pp.750-759, 1961.
- (21) D. Kunii and M. Suzuki, IIIrd. Int. Heat Transfer Conference, IV, p.344, Chicago, 1965.
- (22) W. E. Ranz, Chem. Eng. Progr. 48, 248, 1952。
- (23) 若尾 法昭ら、化学工学、22, 780, 1958。
- (24) 甲藤 好郎ら、「伝熱学特論」、養賢堂、1984。
- (25) L. C. Laming, Int. Develop. Heat Transfer, 2, ASME, p.150, 1961
- (26) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Oxford Univ. Press, 1959.
- (27) J. Crank, Mathematics of Diffusion, Oxford Univ. Press, 1970.
- (28) J. Olive and P. Jolas, "Internal blockage in a fissile Super-Phenix type subassembly: the Scarlet experiments and their interpretation by the Cafca-NA3 code," Nucl. Energy, Vol. 29, No.4, p. 287, August, 1990.
- (29) H. Ohshima and Y. Ieda, "Thermohydraulic Aspects of Porous Blockages in a Fuel Subassembly of Fast Breeder Reactor," Proc. of IAEA Int. Topical Mtg. on Sodium Cooled Fast Reactor Safety 94, Obninsk, Russian(1994).

6. 謝 辞

本研究の遂行にあたり、解析作業や図形処理において、株式会社エヌ・デー・デーの橋本昭彦氏に多大なる御協力を頂いた。ここに、謝意を表する。

< 付録 1 >

入力仕様の変更

付録1 入力仕様の変更

ASFRE-IIIマニュアル (PNC N941 85-106) の入力仕様の説明にあるNo.66のデータを次のNo.66, No.66', No.67の仕様に変更する。

(1) No.66

変数名	FORMAT	内容
NBLCK	3I5	閉塞領域の数
IBFRI		圧損相関式—0:Blasius, 1:Ergun, 2:Carman
IBHTM	6E10.0	熱伝達相関式—0:Simplified(DEG), 1:Modified, 2:等価熱伝導度モデル
DHBP		IBHTM=1 OR 2:閉塞物粒子直径(m)—熱伝達計算用 IBHTM=0:使用しない、0.0を入力
DHBA		IBFRI=0:閉塞部内軸方向水力等価直径(m)、 IBFRI=1 OR 2:閉塞物粒子平均直径(m)—圧損計算用
DHBL		IBFRI=0:閉塞部内径方向水力等価直径(m) IBFRI=1 OR 2:使用しない、0.0を入力
CEL		IBHTM=0 OR 1:燃料ピン—冷却材接触面積割合、 IBHTM=2:使用しない、0.0を入力
CSHAP		IBFRI=2:形状係数 (default=0.8, 通常0.6~0.8) IBFRI=0 OR 1:使用しない、0.0を入力
CVEL1		IBFRI=1 OR 2:圧損計算参照流速Factor, IBFRI=2:使用しない、1.0を入力

(2) No.66'

変数名	FORMAT	内容
FVOL	8E10.0	閉塞領域内のボリュームポロシテイ
FARA		閉塞領域内の軸方向エリアポロシテイ
FARL		閉塞領域内の横方向エリアポロシテイ
TKBLK		閉塞物熱伝導率(W/mK)
HWB		IBHTM=0 OR 1:構造物—閉塞物間熱伝達係数(W/m ² K), IBHTM=2:使用しない、0.0を入力
HBLI		IBHTM=0:閉塞物—流体間熱伝達係数(W/m ² K) IBHTM=1:内部で計算、0.0を入力 IBHTM=2:使用しない、0.0を入力
ABLI		IBHTM=0 OR 1:閉塞物—流体接触面積割合(1/m), IBHTM=2:使用しない、0.0を入力
CVEL2		IBHTM=1 OR 2:熱伝達計算参照流速Factor, IBHTM=0:使用しない、0.0を入力

(3) No.67

変数名	FORMAT	内容
LBLC(K)	2I5	閉塞領域(K)が占める軸方向メッシュの数
IBLC(K)		閉塞領域(K)が占めるサブチャンネルの数 (K=1,NBLCK)
LBL(L,K)	16I5	閉塞領域(K)の軸方向位置 (昇順で入力) (L=1,LBLC(K))
LBI(L,K)	16I5	閉塞領域(K)の占めるサブチャンネル番号 (I=1,IBLC(K))

< 付録2 >

追加配列・追加COMMON変数

追加・変更サブルーチンの機能

<追加配列・追加COMMON変数>

配列変数名 (サイズ)	アドレス	タイプ	内 容
T6B (imax, lmax)	LVOL (9)	real 8	n+1 th time step における閉塞物の温度
T6BN (imax, lmax)	LVOL (10)	real 8	n th time step における閉塞物の温度 (° k)
D6B (imax, lmax)	LVOL (11)	real 8	n+1 th time step における閉塞物の密度 (kg/m ²)
D6BN (imax, lmax)	LVOL (12)	real 8	n th time step における閉塞物の密度 (kg/m ²)
E6B (imax, lmax)	LVOL (13)	real 8	n+1 th time step における閉塞物の内部エネルギー (J/kg)
E6BN (imax, lmax)	LVOL (14)	real 8	n th time step における閉塞物の内部エネルギー (J/kg)
VOLBL (imax, lmax)	LGEO (35)	real 8	C.V.内の閉塞物の体積 (m ³)
ARABL (imax, lmax)	LGEO (36)	real 8	C.V.境界の閉塞物の面積 (軸方向) (m ²)
ARLBL (kmax, lmax)	LGEO (37)	real 8	C.V.境界の閉塞物の面積 (横方向) (m ²)
HTBL (imax, lmax)	LHTC (17)	real 8	ピン表面-閉塞物間熱伝達係数 (W/m ² k)
HTBSL (imax, lmax)	LHTC (18)	real 8	heat slab-閉塞物間熱伝達係数 (W/m ² k)
TBDIF (imax, lmax)	LFLX (3)	real 8	閉塞物エネルギー式の熱伝導項
CTB1 (imax, lmax)	LWRK (22)	real 8	T_b^{n+1} を T_l^{n+1} で表す場合の定数、(22) 式参照
CTB2 (imax, lmax)	LWRK (23)	real 8	T_b^{n+1} を T_l^{n+1} で表す場合の定数、(22) 式参照

※imax, kmax, lmaxは、それぞれサブチャンネル数、ギャップ数、軸方向メッシュ数を表す。

COMMON変数名	ブロック名	タイプ	内 容
FVOL	BLK	real 8	
FARA	BLK	real 8	
FARL	BLK	real 8	
HWB	BLK	real 8	
HBLI	BLK	real 8	入力データNo.66、No.66'参照
ABLI	BLK	real 8	
DHBA	BLK	real 8	
DHBL	BLK	real 8	
CEL	BLK	real 8	

＜追加・変更サブルーチンの機能＞

サブルーチン名 (または、ファンクション名)	機 能
ALOCV	variable dimensionのアドレス計算
ADJSZ	variable dimensionのallocation
QEQSTA	密度、内部エネルギーの計算
QFCOND	燃料ピン熱伝導方程式の前進消去
QFCOXT	燃料ピン熱伝導方程式の後退代入
QGEMET	幾何形状の計算
QFRICF	摩擦力の計算
QHTRCF	熱伝達の計算
QINITL	初期計算
PROPBL	閉塞物の物性値の相関式
QREDIN	入力
QSBEDT	プリント出力
TIDVAR	出力変数のコントロール
QUPDAT	変数更新
QCALCL	質量保存式、エネルギー保存式を解く
QCONVE	対流項、熱伝導項を計算する
QBCSET	境界条件の設定

< 付録 3 >

コレクション・セット

```

*/ *****
*/
*/      MODIFIED POROUS BLOCKAGE MODEL - PRESSURE DROP
*/
*/      IBFRI = 0 : BRASIUS EQUATION
*/              1 : ERGUN CORRELATION
*/              2 : CARMAN CORRELATION
*/
*/      1994. MAR. 13                      BY OHS
*/
*/      HEAT TARANSFER MODEL
*/
*/      IBHTM = 0 : SIMPLIFIED MODEL (BY DEG)
*/              1 : MODIFIED DEG MODEL
*/              2 : EQUIVALENT THERMAL CONDUCTIVITY MODEL
*/                  (HEAT CAPACITY OF BLOCKAGE IS NOT CONSIDERED)
*/
*/      1994. MAR. 28                      BY OHS
*/
*/ *****
*/
*/ID BLMOD
*/
*/
*/D ALOCV. 190
*/      LINT(29) = LINT(28) + LMAX*IMAX
*/D ALOCV. 191
*/      LINT(30) = LINT(29) + IMAX*IMAX
*/D QREDIN. 64
*/      COMMON /BLK /      NBLCK, IBFRI, FVOL, FARA, FARL,
*/      1                      DHBP, DHBA, DHBL, CSHAP, CVEL1,
*/      2                      IBHTM, TKBLK, HWB, HBLI, ABLI, CEL, CVEL2
*/D QREDIN. 104
*/      DIMENSION LBL(LMAX, IMAX), LBI(IMAX, IMAX), LBS(IMAX, LMAX),
*/      1                      LGL(LMAX)
*/I QREDIN. 683
*/      READ(IRED, 100) NBLCK, IBFRI, IBHTM
*/      IF(NBLCK.LE.0) THEN
*/          GOTO 7200
*/      ELSE IF(NBLCK.GT.IMAX) THEN
*/          WRITE(6, 9900)
*/          STOP
*/      ENDIF
*/      WRITE(IPRN, 871) NBLCK
*/      IF(IBFRI.EQ.0) THEN
*/          WRITE(IPRN, 872)
*/      ELSE IF(IBFRI.EQ.1) THEN
*/          WRITE(IPRN, 873)
*/      ELSE
*/          WRITE(IPRN, 874)
*/      ENDIF
*/      WRITE(IPRN, 876) IBHTM
*/D QREDIN. 684, 722
*/      READ(IRED, 110) DHBP, DHBA, DHBL, CEL, CSHAP, CVEL1
*/      READ(IRED, 110) FVOL, FARA, FARL, TKBLK, HWB, HBLI, ABLI, CVEL2
*/      IF(FVOL.GE.1.0D-10) THEN
*/          WRITE(IPRN, 880)
*/          WRITE(IPRN, 881) FVOL
*/          WRITE(IPRN, 882) FARA
*/          WRITE(IPRN, 883) FARL
*/          WRITE(IPRN, 884) DHBA
*/          WRITE(IPRN, 885) DHBL
*/          WRITE(IPRN, 886) CEL
*/          WRITE(IPRN, 894) CVEL1
*/          WRITE(IPRN, 892) DHBP
*/          WRITE(IPRN, 887) HWB
*/          WRITE(IPRN, 888) HBLI
*/          WRITE(IPRN, 889) ABLI
*/          WRITE(IPRN, 893) CVEL2

```

```

WRITE(IPRN,879) TKBLK
IF(IBFRI.EQ.2) THEN
  WRITE(IPRN,891) CSHAP
ENDIF
ELSE
  WRITE(IPRN,890)
END IF
DO 7110 K=1,NBLCK
  READ(IRED,100) LBLC,IBLC
  IF(LBLC.GT.0) READ(IRED,100) (LBL(L,K),L=1,LBLC)
  IF(IBLC.GT.0) READ(IRED,100) (LBI(I,K),I=1,IBLC)
  IF(FVOL.LT.1.0D-10) THEN
    IPB =1
  ELSE
    IPB =2
  END IF
  DO 7300 L =1,LBLC
    LB =LBL(L,K)
    DO 7300 I =1,IBLC
      IB =LBI(I,K)
      LBS(IB,LB) =IPB
7300 CONTINUE
    WRITE(IPRN,720) K
    DO 7310 L =1,LBLC
      WRITE(IPRN,280) L,LBL(L,K)
7310 CONTINUE
    WRITE(IPRN,730) K
    DO 7320 I =1,IBLC
      WRITE(IPRN,280) I,LBI(I,K)
7320 CONTINUE
7110 CONTINUE
*D QREDIN.844,845
720 FORMAT('0',5X,'AXIAL MESH NUMBERS OF BLOCKAGE NO.',I3)
730 FORMAT('0',5X,'SUBCHANNEL NUMBERS OF BLOCKAGE NO.',I3)
*I QREDIN.869
871 FORMAT(' ',5X,'NUMBER OF BLOCKAGE REGION' /
& ' ',5X,'(-)                               =' ,2X,I5)
872 FORMAT(' ',5X,'BRASIUUS CORRELATION HAS BEEN SELECTED' /)
873 FORMAT(' ',5X,'ERGUN CORRELATION HAS BEEN SELECTED' /)
874 FORMAT(' ',5X,'CARMAN CORRELATION HAS BEEN SELECTED' /)
876 FORMAT(' ',5X,'HEAT TRANSFER MODEL FLAG' /
& ' ',5X,'(-)                               =' ,2X,I5)
879 FORMAT(' ',5X,'THERMAL CONDUCTIVITY OF BLOCKAGE =' ,2X,1PD12.5)
*I QREDIN.886
891 FORMAT(' ',5X,'SHAPE FACTOR FOR CARMAN CORRELATION' /
& ' ',5X,'(-)                               =' ,2X,1PD12.5)
892 FORMAT(' ',5X,'DIAMETER OF BLOCKAGE PARTICLE' /
& ' ',5X,'(M)                               =' ,2X,1PD12.5)
893 FORMAT(' ',5X,'VELOCITY FACTOR FOR H.T.C. ESTIMATION' /
& ' ',5X,'(-)                               =' ,2X,1PD12.5)
894 FORMAT(' ',5X,'VELOCITY FACTOR FOR PRESSURE DROP ESTIMATION' /
& ' ',5X,'(-)                               =' ,2X,1PD12.5)
9900 FORMAT(' ',5X,'NUMBER OF BLOCKAGE AREA IS GREATER THAN',
& 'IMAX! PLEASE CHECK DIMENSION.')
*D QGEMET.28
COMMON /BLK / NBLCK,IBFRI,FVOL,FARA,FARL,
1 DHBP,DHBA,DHBL,CSHAP,CVEL1,
2 IBHTM,TKBLK,HWB,HBLI,ABLI,CEL,CVEL2
*D QFRICF.41
COMMON /BLK / NBLCK,IBFRI,FVOL,FARA,FARL,
1 DHBP,DHBA,DHBL,CSHAP,CVEL1,
2 IBHTM,TKBLK,HWB,HBLI,ABLI,CEL,CVEL2
*I QFRICF.64
DATA EPS5, EPS7, EPS8 /1.0D-20, 1.0D-10, 1.0D-20/
*I QFRICF.198
C *****
C AXIAL DRAG FORCE IN BLOCKAGE
C *****
IF(NBLCK.EQ.0) GOTO 1730

```

```

IF(IBFRI.EQ.1) GOTO 1710
IF(IBFRI.EQ.2) GOTO 1720
C
C *** BRASIUS CORRELATION ***
C
*I QFRICF.219
  GOTO 1730
C
C *** ERGUN CORRELATION ***
C
1710  WVL1 = CVEL1*WVL*FVOL
      IF(LBS(I,L).EQ.2.AND.LBS(I,L+1).EQ.2) THEN
        FRT = (1.0DO-FVOL)*RHL*DABS(WVL1)/(FVOL**3)/DHBA
        FLT = (1.0DO-FVOL)**2*VISL/(FVOL**3)/(DHBA**2)
        DRMLA(I,L) = 1.5D+02*FLT+3.5D0*FRT
        DRMLAC(I,L) = -1.75D0*FRT*WVL1
      ELSE IF(LBS(I,L).EQ.2.OR.LBS(I,L+1).EQ.2) THEN
        FRT = (1.0DO-FVOL)*RHL*DABS(WVL1)/(FVOL**3)/DHBA
        FLT = (1.0DO-FVOL)**2*VISL/(FVOL**3)/(DHBA**2)
        DRMLA(I,L) = 7.5D+01*FLT+1.75D0*FRT
        DRMLAC(I,L) = -0.875D0*FRT*WVL1
        DH=DHKZ(I,L)
        REL=RENOLD(RHL,WVL,DH,VISL)
        IF(LFRIC.EQ.4) THEN
          LFRIWA =2
        ELSE
          LFRIWA =LFRIC
        END IF
        CFWL=WFRIC(LFRIWA,REL,REGRH,PBD,HBD)
        DRMLA(I,L)=0.5D0*CFWL*RHL*DABS(WVL)/DH+DRMLA(I,L)
        DRMLAC(I,L)=-0.25D0*DRMLA(I,L)*WVL+DRMLAC(I,L)
      END IF
      GOTO 1730
C
C *** CARMAN CORRELATION ***
C
1720  WVL1 = CVEL1*WVL*FVOL
      IF(LBS(I,L).EQ.2.AND.LBS(I,L+1).EQ.2) THEN
        AVAL = 6.0DO*(1.0DO-FVOL)/CSHAP/DHBA
        REYA = RHL*DABS(WVL1)/AVAL/VISL
        FACT = 5.0DO/REYA+0.4D0/(REYA**0.1)
        DRMLA(I,L) = 2.0DO*FACT*RHL*AVAL*DABS(WVL1)/(FVOL**3)
        DRMLAC(I,L) = -1.0DO*FACT*RHL*AVAL*DABS(WVL1)*WVL1/(FVOL**3)
      ELSE IF(LBS(I,L).EQ.2.OR.LBS(I,L+1).EQ.2) THEN
        AVAL = 6.0DO*(1.0DO-FVOL)/CSHAP/DHBA
        REYA = RHL*DABS(WVL1)/AVAL/VISL
        FACT = 5.0DO/REYA+0.4D0/(REYA**0.1)
        DRMLA(I,L) = FACT*RHL*AVAL*DABS(WVL1)/(FVOL**3)
        DRMLAC(I,L) = -0.5D0*FACT*RHL*AVAL*DABS(WVL1)*WVL1/(FVOL**3)
        DH=DHKZ(I,L)
        REL=RENOLD(RHL,WVL,DH,VISL)
        IF(LFRIC.EQ.4) THEN
          LFRIWA =2
        ELSE
          LFRIWA =LFRIC
        END IF
        CFWL=WFRIC(LFRIWA,REL,REGRH,PBD,HBD)
        DRMLA(I,L)=0.5D0*CFWL*RHL*DABS(WVL)/DH+DRMLA(I,L)
        DRMLAC(I,L)=-0.25D0*DRMLA(I,L)*WVL+DRMLAC(I,L)
      END IF
C
1730 CONTINUE
*D QFRICF.376,385
C *****
C LATERAL DRAG FORCE IN BLOCKAGE
C *****
IF(NBLCK.EQ.0) GOTO 2090
UUL = U6L(K,L)
AUL = DABS(UUL)

```

```

IF (TIME.LE.EPS7.OR.AUL.LT.EPS5) THEN
  UUL = EPS8
ENDIF
IF (IBFRI.EQ.1) GOTO 2410
IF (IBFRI.EQ.2) GOTO 2420

C
C *** BRASIUS CORRELATION ***
C
*I QFRICF.401
  GOTO 2090
C
C *** ERGUN CORRELATION ***
C
2410 UUL1 = CVEL1*UUL*FVOL
IF (LBS(I,L).EQ.2.AND.LBS(J,L).EQ.2) THEN
  FRT = (1.0D0-FVOL)*RHL*DABS(UUL1)/(FVOL**3)/DHBA
  FLT = (1.0D0-FVOL)**2*VISL/(FVOL**3)/(DHBA**2)
  DRMLL(K,L) = 1.5D+02*FLT+3.5D0*FRT
  DRMLLC(K,L) = -1.75D0*FRT*UUL1
ELSE IF (LBS(I,L).EQ.2.OR.LBS(J,L).EQ.2) THEN
  FRT = (1.0D0-FVOL)*RHL*DABS(UUL1)/(FVOL**3)/DHBA
  FLT = (1.0D0-FVOL)**2*VISL/(FVOL**3)/(DHBA**2)
  DRMLL(K,L) = 7.5D+01*FLT+1.75D0*FRT
  DRMLLC(K,L) = -8.75D-01*FRT*UUL1
  DH = DHKR(K,L)
  RE = RENOLD(RHL,UUL,DH,VISL)
  CFW = GSFRIC(RE,DH)
  DRMLL(K,L) = 0.5D0*CFW*RHL*DABS(UUL)/DH+DRMLL(K,L)
  DRMLLC(K,L) = -0.25D0*DRMLL(K,L)*UUL+DRMLLC(K,L)
END IF
  GOTO 2090

C
C *****
C CARMAN CORRELATION
C *****
C
2420 UUL1 = CVEL1*UUL*FVOL
IF (LBS(I,L).EQ.2.AND.LBS(J,L).EQ.2) THEN
  AVAL = 6.0D0*(1.0D0-FVOL)/CSHAP/DHBA
  REYA = RHL*DABS(UUL1)/AVAL/VISL
  FACT = 5.0D0/REYA+0.4D0/(REYA**0.1)
  DRMLL(K,L) = 2.0D0*FACT*RHL*AVAL*DABS(UUL1)/(FVOL**3)
  DRMLLC(K,L) = -1.0D0*FACT*RHL*AVAL*DABS(UUL1)*UUL1/(FVOL**3)
ELSE IF (LBS(I,L).EQ.2.OR.LBS(J,L).EQ.2) THEN
  AVAL = 6.0D0*(1.0D0-FVOL)/CSHAP/DHBA
  REYA = RHL*DABS(UUL1)/AVAL/VISL
  FACT = 5.0D0/REYA+0.4D0/(REYA**0.1)
  DRMLL(K,L) = FACT*RHL*AVAL*DABS(UUL1)/(FVOL**3)
  DRMLLC(K,L) = -0.5D0*FACT*RHL*AVAL*DABS(UUL1)*UUL1/(FVOL**3)
  DH = DHKR(K,L)
  RE = RENOLD(RHL,UUL,DH,VISL)
  CFW = GSFRIC(RE,DH)
  DRMLL(K,L) = 0.5D0*CFW*RHL*DABS(UUL)/DH+DRMLL(K,L)
  DRMLLC(K,L) = -0.25D0*DRMLL(K,L)*UUL+DRMLLC(K,L)
END IF

*/
*/ *****
*/
*/ HEAT TARANSFER MODEL
*/
*/ *****
*/
*D ADJSZ.232
  2 ,B(LJUN(3)),B(LGEO(1)),B(LGEO(7)),B(LGEO(17)),B(
*D QHTRCF.3
  1 ,D6L,W6L,DZM,DHKZ,DHQROD,DHQSLB,TWROD,HTCL,TWSLB
*D QHTRCF.31
  COMMON /BLK / NBLCK,IBFRI,FVOL,FARA,FARL,
  1 DHBP,DHBA,DHBL,CSHAP,CVEL1,

```



```

      2                IBHTM, TKBLK, HWB, HBLI, ABLI, CEL, CVEL2
*D QHTRCF. 34
  1 , DHQSLB(IMAX, LMAX), DZM(LMAX) , D6L(IMAX, LMAX)
*I QHTRCF. 81
  IF(IBHTM.NE.0) GOTO 2100
C*****
C ORIGINAL BLOCKAGE MODEL
C*****
C
*I QHTRCF. 88
  GOTO 1000
C
C*****
C EFFECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN BLOCKAGE REGION
C*****
C
2100 CONTINUE
  WLL = CVEL2*WL*FVOL
  REP = RENOLD(RHL, WLL, DHBP, VISL)
  DZ = DZM(L)
  CALL BHTCAL(HO, WL, RHL, TL, PRES, REP, PRL, DHBP, TKL, TKBLK, DHE,
  1      DZ, FARL, FVOL, CVEL2)
  IF(LBS(I, L).EQ.2.AND.IBHTM.EQ.1) THEN
    HTCL(I, L) = HO
    HTBL(I, L) = (1.0DO-CEL)*HWB
  ELSE IF(LBS(I, L).EQ.2.AND.IBHTM.EQ.2) THEN
    HTCL(I, L) = HO
    HTBL(I, L) = 0.0DO
  ELSE
    HTCL(I, L) =HL
    HTBL(I, L) =0.0DO
  END IF
*I QHTRCF. 118
  IF(IBHTM.NE.0) GOTO 2200
C*****
C ORIGINAL BLOCKAGE MODEL
C*****
C
*I QHTRCF. 125
  GOTO 2300
C
C*****
C EFFECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN BLOCKAGE REGION
C*****
C
2200 CONTINUE
  WLL = CVEL2*WL*FVOL
  REP = RENOLD(RHL, WLL, DHBP, VISL)
  DZ = DZM(L)
  CALL BHTCAL(HO, WL, RHL, TL, PRES, REP, PRL, DHBP, TKL, TKBLK, DHE,
  1      DZ, FARL, FVOL, CVEL2)
  IF(LBS(I, L).EQ.2.AND.IBHTM.EQ.1) THEN
    HTLSL(I, L) = HO
    HTBSL(I, L) = (1.0DO-CEL)*HWB
  ELSE IF(LBS(I, L).EQ.2.AND.IBHTM.EQ.2) THEN
    HTLSL(I, L) = HO
    HTBSL(I, L) = 0.0DO
  ELSE
    HTLSL(I, L) =HL
    HTBSL(I, L) =0.0DO
  END IF
2300 CONTINUE
*I SHTCAL. 47
  SUBROUTINE BHTCAL(HO, WL, RHL, TL, P, REP, PR, DP, TKL, TKS, DH, DZ,
  1      FARL, FVOL, CVEL2)
  IMPLICIT REAL*8(A-H, O-Z)
  DATA C0, C1 /2.6D+00, 2.0D-02/
  DATA S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 /1.543D+00, -1.980D-01, 9.140D-03,
  1      4.039D+00, 9.260D-02, -1.830D-03, 1.247D-05/

```

```

DATA R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7 /2.664D-02, 7.610D-04, -1.201D-04,
1      1.272D-01, 1.171D-02, -2.482D-04, 1.785D-06/
C
C THIS SUBROUTINE CALCULATES EFFECTIVE HEAT TRANSFER
C
C      COEFFICIENT IN BLOCKAGE REGION.
C
C *****
C      NUSSELT NUMBER IN BOUNDARY LAYER - TNUW
C *****
C
TKP = TKS/TKL
FAI1 = ((TKP-1.0)/TKP)**2
FAI2 = DLOG(TKP)-(TKP-1.0)/TKP
FAI = 0.5*FAI1/FAI2-2.0/TKP/3.0
TKOKF= FVOL+(1.0-FVOL)/(FAI+2.0/TKP/3.0)
C
TNUB1= CO*(PR**0.3333)*(REP**0.5)
TNUB2= C1*PR*REP
TKEKF= TKOKF+1.0/(2.0/TNUB1+1.0/TNUB2)
C
TKRKF= BLCOND(RHL,WL,DP,TL,P,TKS,FVOL,CVEL2,2)
TNUW1= 2.0/(1.0/TKEKF-1.0/TKRKF)
TNUW = DABS(TNUW1)
C
C *****
C      EFFECTIVE HEAT TRAN. COEF.
C *****
C
B = 0.5*(DH/DP)*TNUW/TKRKF
IF(B.GT.6.0D+01) THEN
    B = 6.0D+01
ENDIF
IF(B.LE.1.0D+01) THEN
    A1 = S1*B+S2*(B**2)+S3*(B**3)
    FAI = R1*B+R2*(B**2)+R3*(B**3)
ELSE
    A1 = S4+S5*B+S6*(B**2)+S7*(B**3)
    FAI = R4+R5*B+R6*(B**2)+R7*(B**3)
ENDIF
G1 = 4.0*DP*DZ*TKRKF/(DH**2)
GZ = G1/PR/REP
TNUH = (DP/DH)*TKRKF*(A1+FAI/GZ)
HO = TNUH*TKL/DP
C
RETURN
END
*D QCALCL. 32
COMMON /BLK / NBLCK,IBFRI,FVOL,FARA,FARL,
1             DHBP,DHBA,DHBL,CSHAP,CVEL1,
2             IBHTM,TKBLK,HWB,HBLI,ABLI,CEL,CVEL2
*I QCALCL. 96
C
C *** RANZ-MARSHALL EQUATION FOR LIQUID-BLOCKAGE H.T.C.
C
IF(LBS(I,L).EQ.2.AND.IBHTM.EQ.1) THEN
    HPBL1 = HCAP1C(PRESN,TLN)
    TKBL1 = COND1K(PRESN,TLN)
    VIBL1 = VIMU1N(PRESN,TLN)
    W6AV1 = CVEL2*(WLS+WLN)*0.5D0*FVOL
    REP1 = RENOLD(RHOLN,W6AV1,DHBP,VIBL1)
    PRB1 = PRANTL(VIBL1,HPBL1,TKBL1)
    TNUB = 2.0D0+1.8D0*(PRB1**0.33333)*(REP1**0.5)
    HBLI = TNUB*TKBL1/DHBP
ELSE IF(LBS(I,L).EQ.2.AND.IBHTM.EQ.2) THEN
    HBLI = 0.0D0
ENDIF
*D QCONVE. 24
COMMON /BLK / NBLCK,IBFRI,FVOL,FARA,FARL,

```

```

1          DHBP, DHBA, DHBL, CSHAP, CVEL1,
2          IBHTM, TKBLK, HWB, HBLI, ABLI, CEL, CVEL2
*B QCONVE. 94
  IF(IBHTM.EQ.0) GOTO 2100
  IF(LBS(I,LM).EQ.2) THEN
    THKS = BLCOND(D6L(I,LM), WLS, DHBP, T6L(I,LM), P6N(I,LM),
1          TKBLK, FVOL, CVEL2, 1)
  ENDIF
  IF(LBS(I,L).EQ.2) THEN
    THKP = BLCOND(D6L(I,L), WLP, DHBP, T6L(I,L), P6N(I,L),
1          TKBLK, FVOL, CVEL2, 1)
  ENDIF
  IF(LBS(I,LP).EQ.2) THEN
    THKN = BLCOND(D6L(I,LP), WLN, DHBP, T6L(I,LP), P6N(I,LP),
1          TKBLK, FVOL, CVEL2, 1)
  ENDIF
2100 CONTINUE
*D QCONVE. 142
*I QCONVE. 143
  IF(IBHTM.EQ.0) GOTO 2200
  IF(LBS(I,L).EQ.2.AND.LBS(J,L).NE.2) THEN
    THIL = BLCOND(D6L(I,L), WLJ, DHBP, T6L(I,L), P6N(I,L),
1          TKBLK, FVOL, CVEL2, 2)
    THJL = COND1K(P6N(J,L), T6L(J,L))
    THIJ = 1.0/(1.0/THIL+1.0/THJL)
    DIFG = AFFMR(K,L)*THIJ/(CCENT*GCENT(K,L))
  ELSE IF(LBS(I,L).NE.2.AND.LBS(J,L).EQ.2) THEN
    THIL = COND1K(P6N(I,L), T6L(I,L))
    THJL = BLCOND(D6L(J,L), WLJ, DHBP, T6L(J,L), P6N(J,L),
1          TKBLK, FVOL, CVEL2, 2)
    THIJ = 1.0/(1.0/THIL+1.0/THJL)
    DIFG = AFFMR(K,L)*THIJ/(CCENT*GCENT(K,L))
  ENDIF
2200 CONTINUE
*I EDCOND. 22
  REAL FUNCTION BLCOND*8(RHL, UL, DP, T, P, THB, FVOL, CVEL2, IDIR)
  IMPLICIT REAL*8(A-H, O-Z)

C
C      EQUIVALENT THERMAL CONDUCTIVITY OF BLOCKAGE REGION
C
  DATA A0,A1,A2,A3 /-4.401D-01,-4.866D-01,1.109D-01,-1.108D-02/
  DATA B0,B1,B2,B3 /-4.488D-01,-7.472D-01,1.085D-01,-4.996D-03/

C
  THK = COND1K(P, T)
  TAU = DLOG10(THB/THK)
  SS1 = A0+A1*TAU+A2*TAU**2+A3*TAU**3
  SS2 = B0+B1*TAU+B2*TAU**2+B3*TAU**3
  FAI1 = (1.0D+1)**SS1
  FAI2 = (1.0D+1)**SS2
  IF(FVOL.GE.0.26.AND.FVOL.LE.0.476) THEN
    FAI = FAI2+(FAI1-FAI2)*((FVOL-0.260)/0.216)
  ELSE
    FAI = FAI1
  ENDIF

C
  TKEOKF = FVOL+(1.0-FVOL)/(FAI+2.0*THK/THB/3.0)

C
  CP = HCAP1C(P, T)
  VIS = VIMU1N(P, T)
  UL = CVEL2*UL*FVOL
  REP = RENOLD(RHL, UL, DP, VIS)
  PR = PRANTL(VIS, CP, THK)
  IF(REP.GT.5.0D+01) REP = 5.0D+01
  IF(REP.LT.3.0) REP = 3.0

C
  IF(IDIR.EQ.1) THEN
    TKEKF = TKEOKF+0.7*REP*PR
    BLCOND = TKEKF*THK
  ELSE

```

```
TKEKF = TKEOKF+0.1*REP*PR  
BLCOND = TKEKF*THK  
ENDIF  
RETURN  
END
```

< 付録 4 >

ポーラス状閉塞モデル
モデルパラメータの検討

＜ポーラス状閉塞モデル：モデルパラメータの検討＞

今回導入したポーラス状閉塞モデルには、様々な閉塞形態を模擬すべく入力で設定するモデルパラメータがいくつか存在する。本文第3章に示した検証解析を行うにあたって、これらのモデルパラメータが解析結果に与える影響を把握するため、別途パラメータ感度解析を実施した。

1. モデルパラメータ

ここで検討したモデルパラメータは次の3つである。

- 1) FARA : 軸方向流速に対する閉塞領域表面透過面積割合 (surface permeability)
- 2) FARL : 横方向流速 (クロスフロー) に対する閉塞領域表面透過面積割合
- 3) CVEL1 : 閉塞領域圧力損失モデル式に使用する流速のファクター

FARAおよびFARLは閉塞領域を形成する閉塞物の形状・大きさ・詰まり方によって大きく変化する。サブチャンネル解析におけるコントロール・ボリューム (C.V.) は軸方向には細かく設定できても、径方向は1サブチャンネルに対して1メッシュとなるため、これらのパラメータは、閉塞領域内C.V.の流動特性を均一と仮定した上で値を設定することが必要である。化学工業で用いられる充填層に対しては、充填物の種類によって (ラフなものではあるが) その推奨される値あるいは式があるが (例えば文献(20))、一般には充填層のボリューム・ポロシティの数割増しの値が使用されている。

一方、閉塞領域内圧力損失モデル式および等価熱伝導モデル式に参照される流速は、見かけの流速 (同じ流路で閉塞が無いと仮定した場合の流速: superficial velocity) と呼ばれ、

$$(\text{閉塞領域内流速}) \times (\text{ポロシティ})$$

で定義される。これもやはり均一の条件下で使用されるものである。CVEL1はこのみかけの流速を調整するためのファクターである。

2. 解析条件

解析対象は本文3章の検証解析と同様に、Scarlet-2試験とする。19本ピンバンドル体系で発熱中心部近傍に厚み6 cmのポーラス状閉塞を中心6サブチャンネル分設定している。集合体形状データ、境界条件、閉塞部条件をそれぞれ、表A4-1, A4-2, A4-3に示す。また、解析で用いた軸方向メッシュ分割を表A4-4に示す。

解析ケースは表A4-5に示すように6ケースを設定する。ケース1はリファレンスケースで、閉塞領域のポロシティが0.35であることから、そのおおよそ1割増しということで、FARA, FARLとも0.4を設定している。CVEL1については見かけの流速を定義通り用いるため1.0とした。閉塞領域等価熱伝導モデル式に使用する流速のファクターであるCVEL2は各ケースとも1.0で固定とした。

なお、中心6サブチャンネルと閉塞領域でのワイヤースペーサとの位置関係を図A4-1に示しておく。この図には解析結果のプロットに参照するサブチャンネル番号（温度および軸方向流速の定義位置と同等）と、隣接する健全サブチャンネルとの境界となるギャップの番号（下線付き番号：径方向流速の定義位置と同等）も併せて示す。

以下の解析結果の章では、6つの閉塞のあるサブチャンネルにおける軸／横方向流速分布、温度分布のグラフが示されるが、ここでは同一のプロットマークは、同一サブチャンネルに対応した値であることを意味する。

3. 解析結果および考察

1) リファレンスケース（ケース1）

図A4-2に閉塞物を有するサブチャンネル（6つ）における軸方向流速分布を、図A4-3に閉塞領域内拡大図を示す。閉塞領域の上流側ではおおよそ7 m/s程度であった流速が、閉塞物直前で急速に減少し閉塞物内では50 cm/sec以下となっている（中心部では10cm/sec前後）。閉塞物上端部付近で幾分流速の増加が見られ、閉塞領域通過後は後流のwakeの解消とともに流速は回復していく。サブチャンネルごとに流速が異なってくるのは、各サブチャンネルに対するワイヤースペーサの位置関係が異なるためである。流量の大部分は閉塞していない流路へ迂回してしまうため、閉塞物内は閉塞が無い場合の数%程度の流量しか流れないことになる。このわずかな流量で燃料ピンから閉塞物内に放出される熱量を除去することになるため、閉塞物内流況に影響を与える各種閉塞物パラメータは、ピーク温度に対して感度が高いことが予想される。

図A4-4、A4-5には、閉塞物を有するサブチャンネル（6つ）における径方向流速分布およびその閉塞領域部の拡大図を示す。この径方向流れは、正值であれば閉塞サブチャンネル側から隣接する健全サブチャンネル側に流出することを、負値であれば反対に閉塞サブチャンネル側に流入することを意味する。図A4-4では、大部分の流量が閉塞物を回避して健全サブチャンネル側に流れ込むために、閉塞領域直前で全てのギャップ部で（バラツキがあるものの）正のピークが現れている。この中でギャップ番号43に対応するものが最も小さくなっているが、これは図A4-1に示されるとおり、ワイヤースペーサがちょうどギャップを塞ぐ位置になっておりクロスフローが妨げられるためである。閉塞領域内では上流側で流出、下流側で流入、中央部ではサブチャンネルによって流出・流入が異なってくる（図A4-5）。軸方向流速分布の特徴とあわせてみると、上流側では閉塞部の大きな流動抵抗により一旦閉塞領域に流入した流量が隣接した健全サブチャンネル側に押し出されていき、下流側ではwakeの影響等による圧力低下で隣接健全サブチャンネル側から逆に流入してくる。これにより閉塞領域内の下流部で軸方向流速の幾分の回復が見られる。一方、閉塞中央部は非常に流量が小さく、隣接健全サブチャンネル側のクロスフローの強弱およびワイヤースペーサの位置関係で閉塞領域からの流入もしくは流出が決まると考えられる。

図A4-6に閉塞サブチャンネルにおける冷却材温度軸方向分布を示す。冷却材温度は、閉

塞領域下端部分からすべてのサブチャンネルで急激に上昇し始め、閉塞領域の中央付近でピーク温度が現れる。その下流側では温度が低下していくが、これは熱伝導の効果ではなく（もちろんゼロではないが）、上述のように閉塞領域に冷却材が流入してくるためである。各サブチャンネルの軸方向温度分布は閉塞物下端領域を除いて大きくばらついてくるが、これも上述のクロスフローの向き・強弱に連動したものである。

参考までに最も温度の高いサブチャンネル ($I=16$) での温度分布と実験結果との比較を図A4-7に示す。実験での温度ピークは閉塞領域内下流側に発生し、ピーク値も解析に比べて低くなっている。但し、実験で得られた温度分布がどのサブチャンネルでの計測なのか（あるいは計測上の制限から複数のサブチャンネルで計測したものを結んだものなのか）、厳密に閉塞物内の冷却材温度を計測しているか、また閉塞物内温度分布にどの程度局所性が存在するのか現時点では不明であるため、あくまで参考比較であることに留意されたい。

サブチャンネル解析は軸方向メッシュ分割は任意であるものの、径方向では1つのサブチャンネルで温度（+軸方向流速）の定義点は1つである。従って1つのサブチャンネル水平断面の平均温度を表していることになる。仮に閉塞領域にある1つのサブチャンネル水平断面内に無視できない温度分布が発生するとすれば、平均として求められる温度に対して何らかの処理を行いピーク温度を予測する手段が別途必要となる。実験あるいは詳細解析により閉塞断面内における温度分布を求めファクターを導出するか、閉塞パラメータを保守側評価となるように設定して解析を行うなどの対応が考えられよう。

2) パラメータ FARL, FARAの影響

クロスフロー成分に対する閉塞領域境界のpermeabilityを与えるのがFARLである。この影響はケース1（リファレンス、 $FARL=0.4$ ）、ケース2（0.2）、ケース3（0.1）の結果を比較することによって傾向を把握できる。ケース2について、軸方向流速分布、横方向流速分布そして冷却材軸方向温度分布をそれぞれ図A4-8～A4-13に示す。同様にケース3についても図A4-14～A4-19に示す。

FARAの値が小さくなるとクロスフロー成分による閉塞物領域側面での流入・流出量が減少するため、リファレンスケースで見られた閉塞領域除熱に対するクロスフローの寄与分が小さくなる。反対に閉塞物下端から流入し閉塞物内を通過する軸方向流速成分による除熱割合が相対的に大きくなっていく。各ケースの閉塞物側面における横方向流速分布拡大図を比較すると（図A4-5, A4-11, A4-17）、サブチャンネル間のばらつき幅が小さくなり、かつ閉塞物下端から上端にかけて分布形状が単調減少化してくることがわかる（リファレンスケースに比べて流速の絶対値が大きくなっていくところもあるが、これは通過できる面積が小さくなるためであって、流量（流速×面積）は少なくなる）。これらの影響で、軸方向温度分布はリファレンスケースに比べて各サブチャンネル間のばらつきが小さくなり、また、下流側の流入クロスフローが少ない分ピーク温度は下流側にシフトし高くなる（図A4-6, A4-12, A4-18）。

軸方向流速に対するpermeabilityであるFARAについては、FARLを小さくしてクロスフ

ローの影響を少なくした、ケース3 (FARA=0.4)とケース4 (0.6)の結果を比較する。ケース4について、軸方向流速分布、横方向流速分布、冷却材軸方向温度分布、そして実験との比較を図A4-20～A4-25にそれぞれ示す。閉塞部側面における横方向流速を比較すると(図A4-17, A4-23)、どちらのケースも閉塞領域内上流側から中央付近までが流出となり下流側で流入に転ずる傾向は同じだが、流出部分のみケース4の方が流量が多くなっている。これはpermeabilityが大きいために閉塞部下端から流入してくる軸方向流れの量が多くなり、それに比例して側面から流出する量も増加するためである。流入に転じてからはその量に差はほとんど見られない。軸方向温度分布もこの流況の差異に影響され、ケース4の方が上流側の温度上昇勾配が緩やかになり、かつピーク温度も下がる。ピーク以降の温度下降傾向は同じである。

3) パラメータCVEL1の影響

ケース4、5、6の結果を比較することによって、その傾向を把握することができる。ケース5について、軸方向流速分布、横方向流速分布、冷却材軸方向温度分布、そして実験との比較をそれぞれ図A4-26～A4-31に示す。また、ケース6については図A4-32～A4-37に示す。通常、閉塞領域内流動抵抗を求める相関式で使用する流速は、閉塞物が無いとしたときの見かけの流速を用いる。CVEL1はその見かけの流速にかけるファクターである。ケース4ではデフォルトである1.0を使用しているが、この場合解析対象の閉塞物ポロシティは0.35であるから、解析で得られる流速の0.35倍が見かけの流速として相関式で使用されていることになる。ケース5では同様にして解析で得られる流速の0.2倍、ケース6では0.1倍となる。(ちなみに同一径の粒子による最密充填格子では、見かけの流速は閉塞内流速の約0.1倍となる。)

CVEL1が小さくなれば相関式で得られる流動抵抗も小さくなるため、閉塞領域内を通過する軸方向流量は当然多くなる(図A4-21, A4-27, A4-33)。また、横方向流速分布については、各ケースの各サブチャンネルとも流出から流入へ転ずる位置はほとんど変化しないが、CVEL1が小さいほど流速の絶対値は大きくなっている(図A4-23, A4-29, A4-35)。このような閉塞領域内の通過流量の変化に連動して、閉塞領域内軸方向温度分布は温度上昇の傾きが緩やかになり、従ってピーク温度も小さくなる(図A4-24, A4-30, A4-36)。

以上3つのモデルパラメータの影響(感度)を把握した。参考までに実験で得られた温度分布との比較も示したが、この中ではケース6が最も実験データを良く再現していた。これは仮に実験で得られた温度分布が、1つのサブチャンネルにおける正確な閉塞領域内平均冷却材温度軸方向分布を表しているとする、それを解析で再現するためにはケース6のようなパラメータのチューニングが必要となることを意味する。実際には1つのサブチャンネル閉塞領域内に強い横方向温度分布が存在するかどうかは不明で、詳細実験あるいは詳細解析による評価を待たなければならない。サブチャンネル解析手法では、1サブチャンネル内横方向温度分布に対してはあくまで1点近似である。温度分布がつく場合には、別途局所評価手法との組み合わせもしくは保守側評価を与えるパラメータチューニン

グを施す必要がある。

表A4-1 集合体形状データ

発熱部長	1.0[m]
上/下非発熱部	0.18/0.18[m]
燃料ピン外径	8.5[mm]
ワイヤースペーサー外径	1.25[mm]
ピン配列ピッチ	9.79[mm]
ワイヤー巻きピッチ	180.0[mm]
燃料ピン本数	19

表A4-2 境界条件

摩擦係数フラグ	分布抵抗モデル
出力	44.77[kW/pin]
軸方向出力分布	均一
入口流量	3.3[kg/sec]
出口圧力	3.0E5[Pa]
冷却材入口温度	245.8[°C]

表A4-3 閉塞部条件

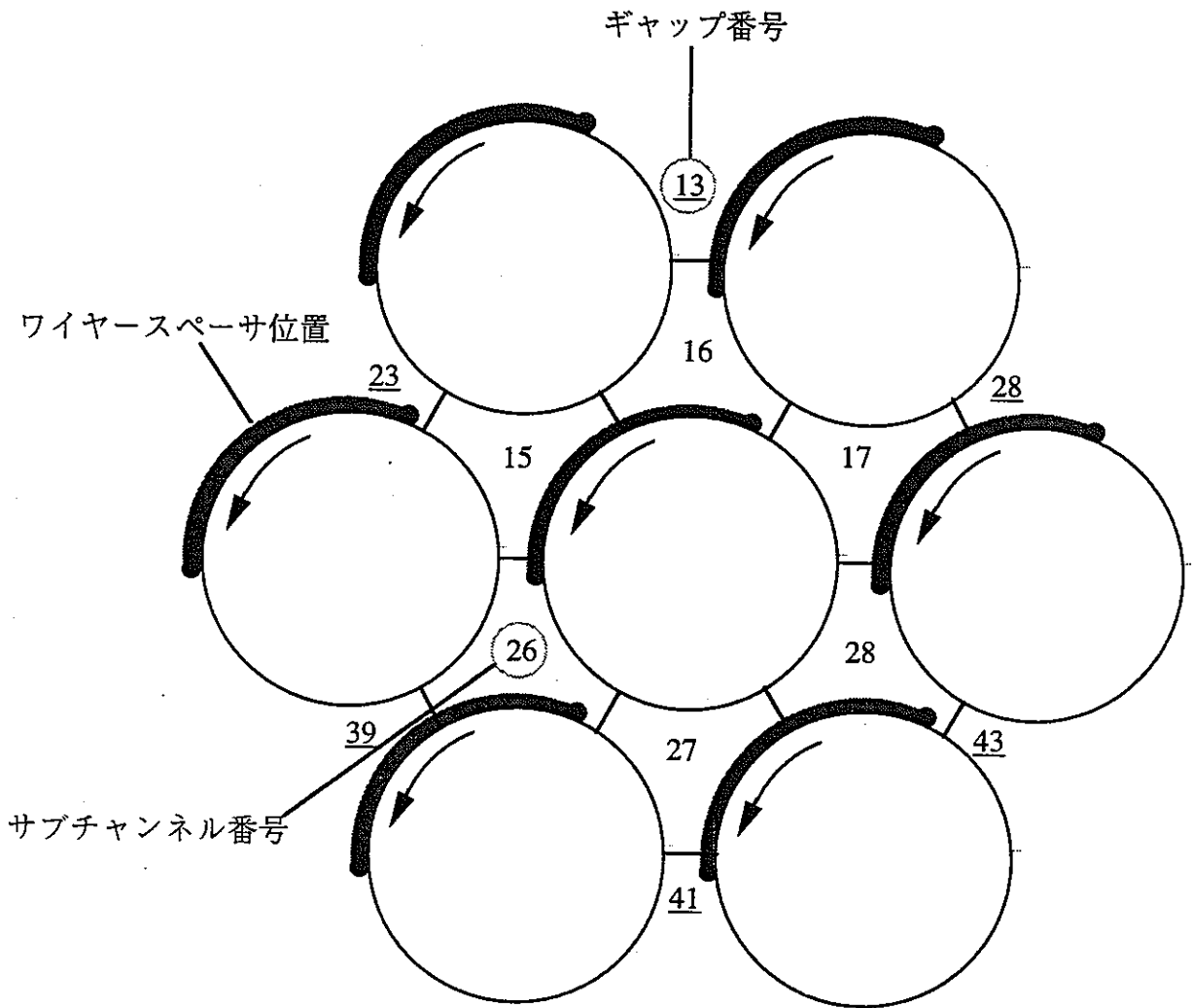
圧損相関式	Ergun
熱伝達相関式	等価熱伝導度モデル
閉塞物粒子直径	0.5[mm]
閉塞物熱伝導率	20.0[W/mK] (チタンを想定)
閉塞部内ポロシティー	0.35
閉塞厚み	60[mm]
閉塞位置	発熱下端より587~647[mm]

表A4-4 軸方向メッシュ分割

軸方向 ブロック番号	軸方向 ブロック長 [mm]	メッシュ番号	メッシュ長 [mm]	備考
1	180.0	1~12	15.0	下部非発熱部
2	510.0	13~46	15.0	発熱部 閉塞領域 587~647(60)
3	22.0	47~48	11.0	
4	35.0	49~53	7.0	
5	110.0	54~75	5.0	
6	42.0	76~81	7.0	
7	11.0	82	11.0	
8	270.0	83~100	15.0	
9	180.0	102~112	15.0	上部非発熱部

表A4-5 解析ケース

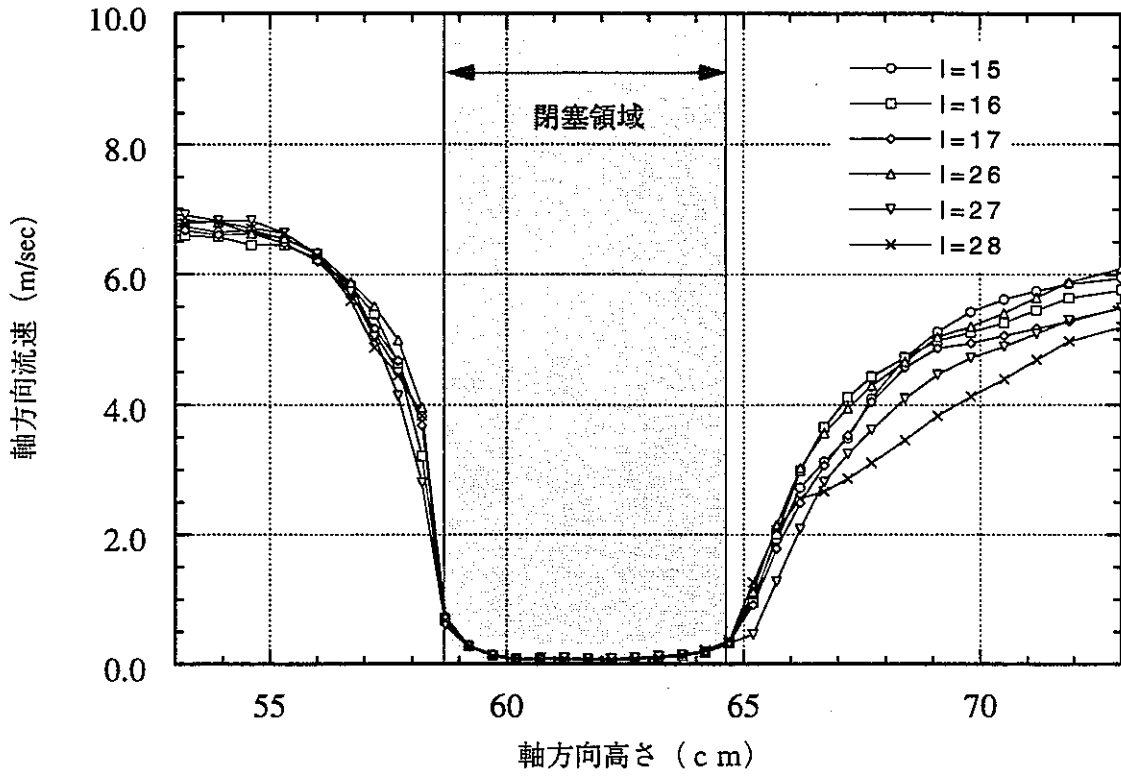
ケース	FARA	FARL	CVEL1	CVEL2
ケース1	0.4	0.4	1.00	1.00
ケース2		0.2		
ケース3		0.1		
ケース4	0.6		0.57	
ケース5				
ケース6		0.29		



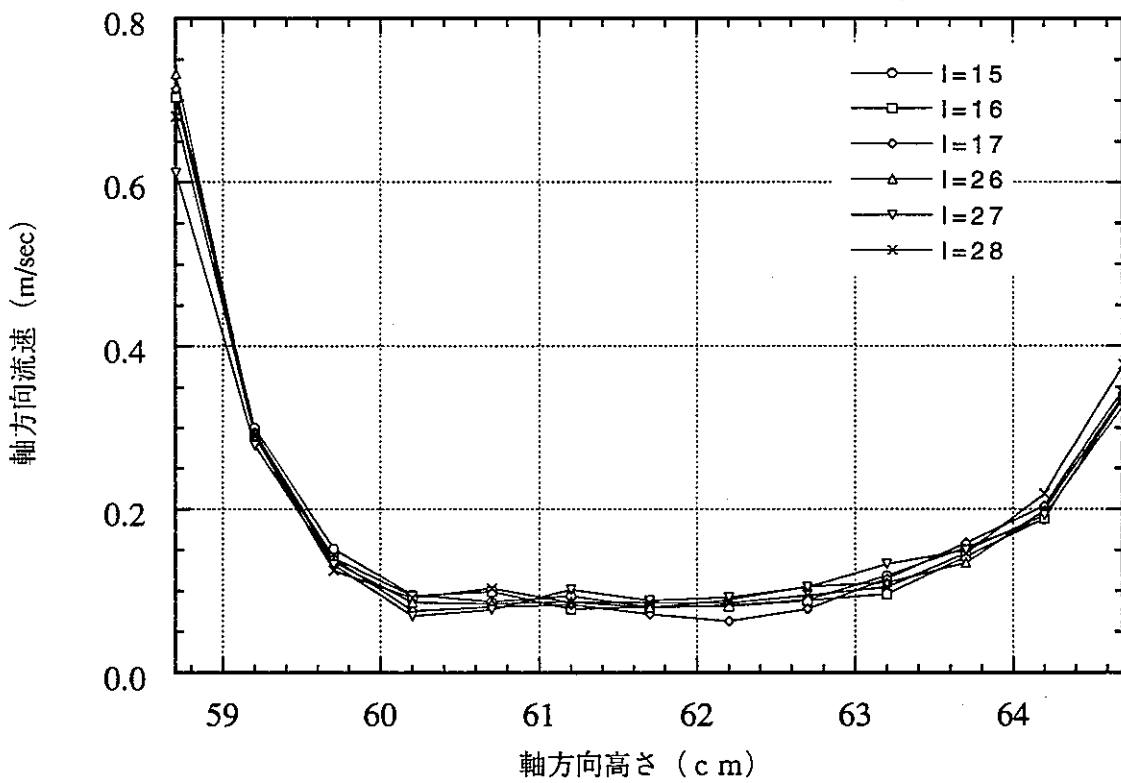
SCARLET 体系 (集合体上端側からの視点)

* ワイヤースペーサは反時計回り

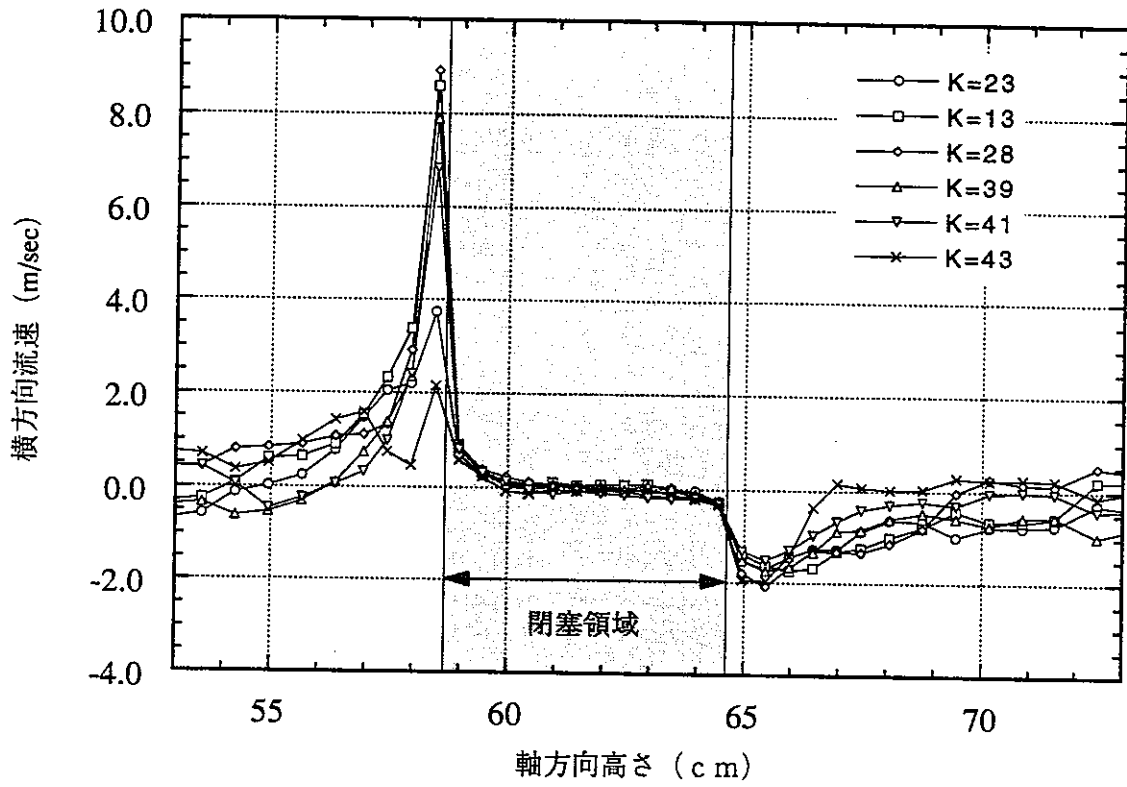
図A4-1 閉塞領域におけるワイヤースペーサと各サブチャンネルの位置関係



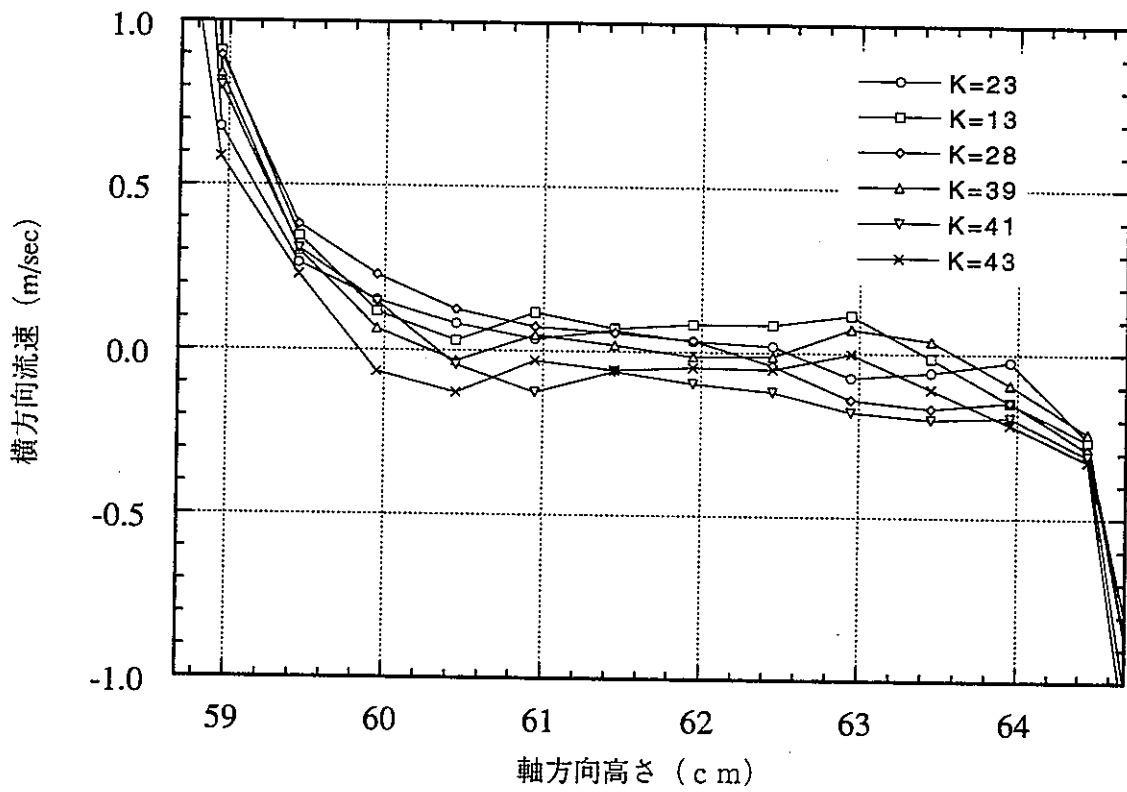
図A4-2 冷却材軸方向流速分布 (ケース1)



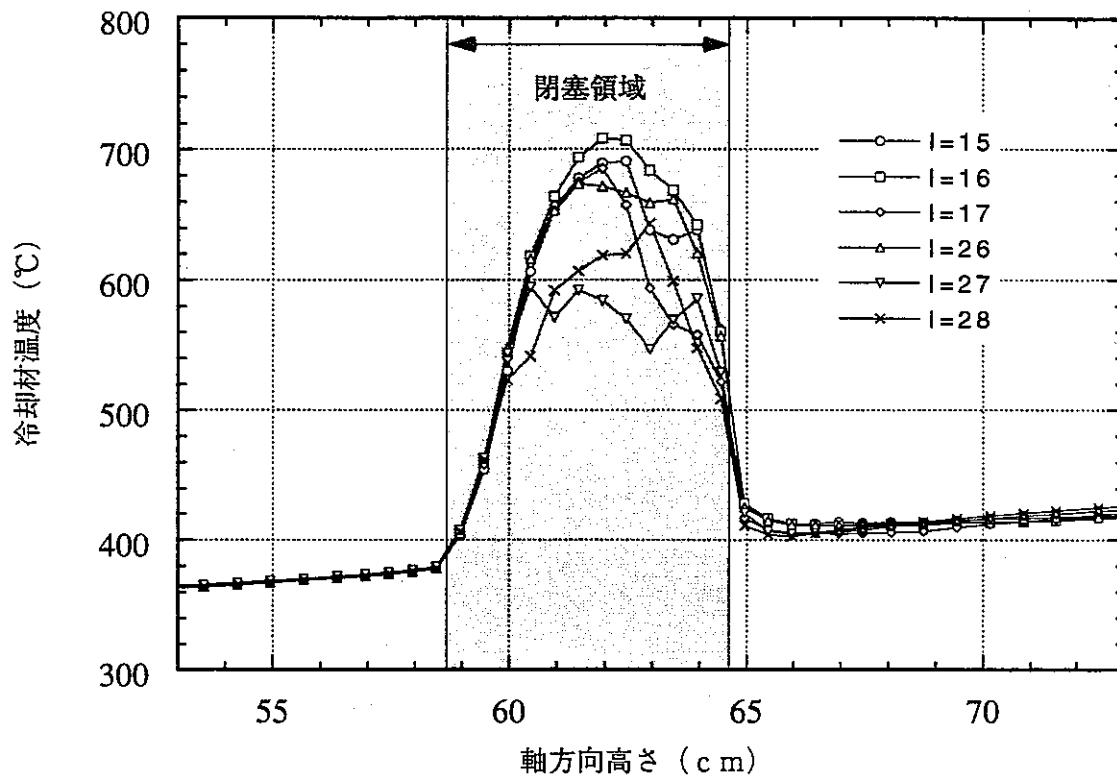
図A4-3 冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース1)



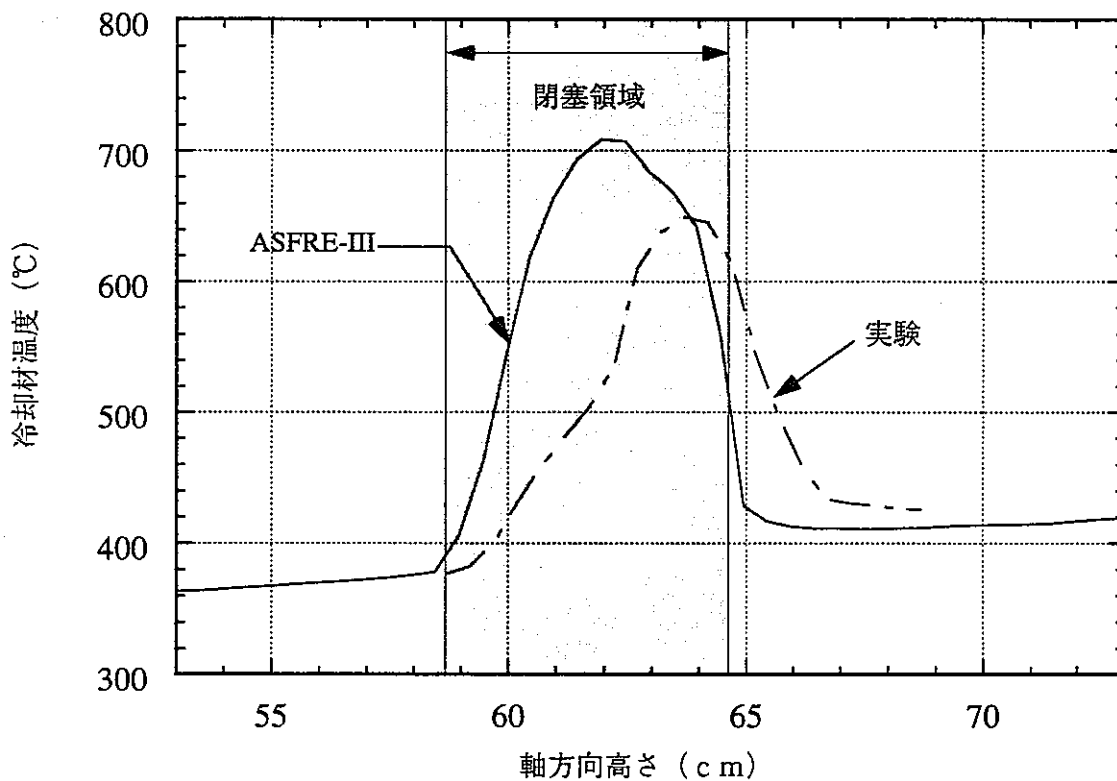
図A4-4 冷却材横方向流速分布 (ケース1)



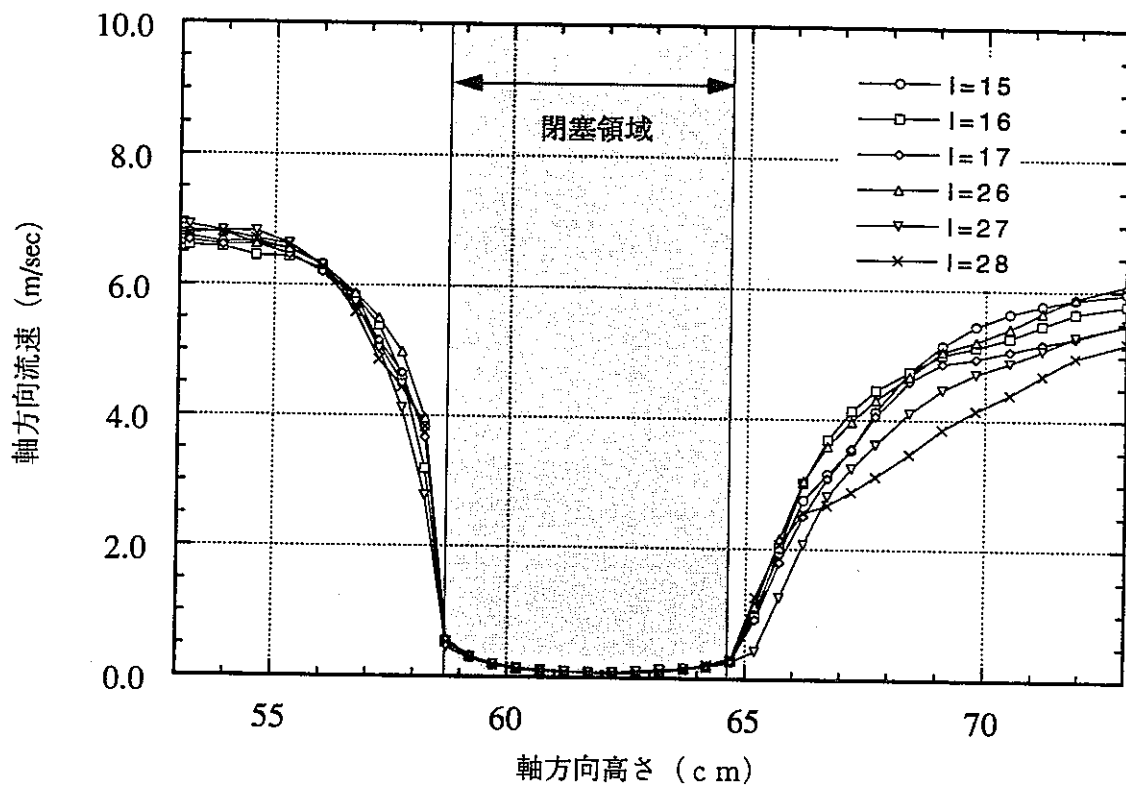
図A4-5 冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース1)



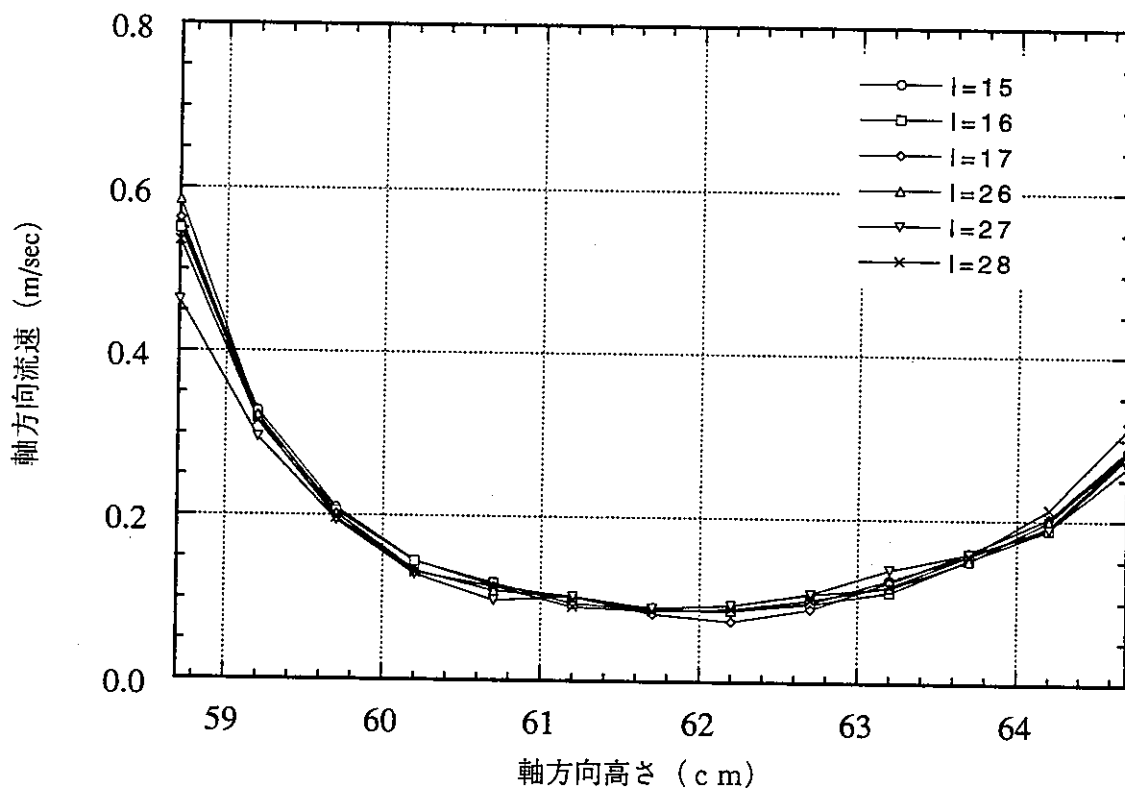
図A4-6 冷却材軸方向温度分布 (ケース1)



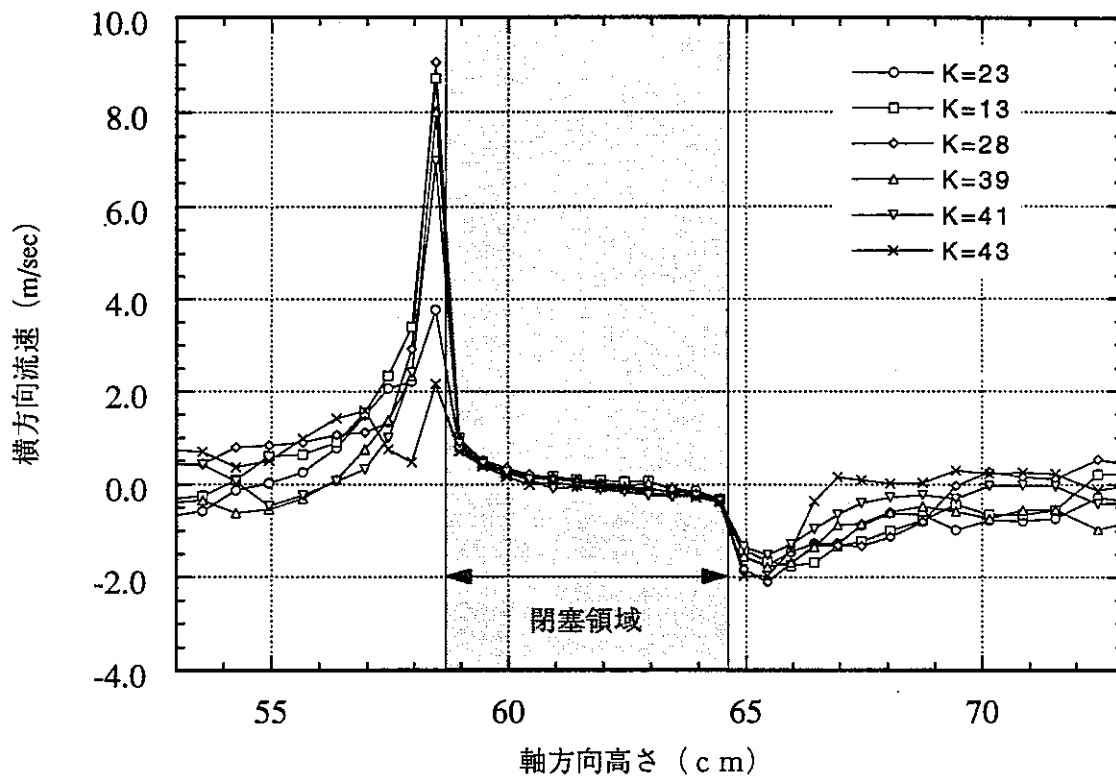
図A4-7 冷却材軸方向温度分布 (ケース1)



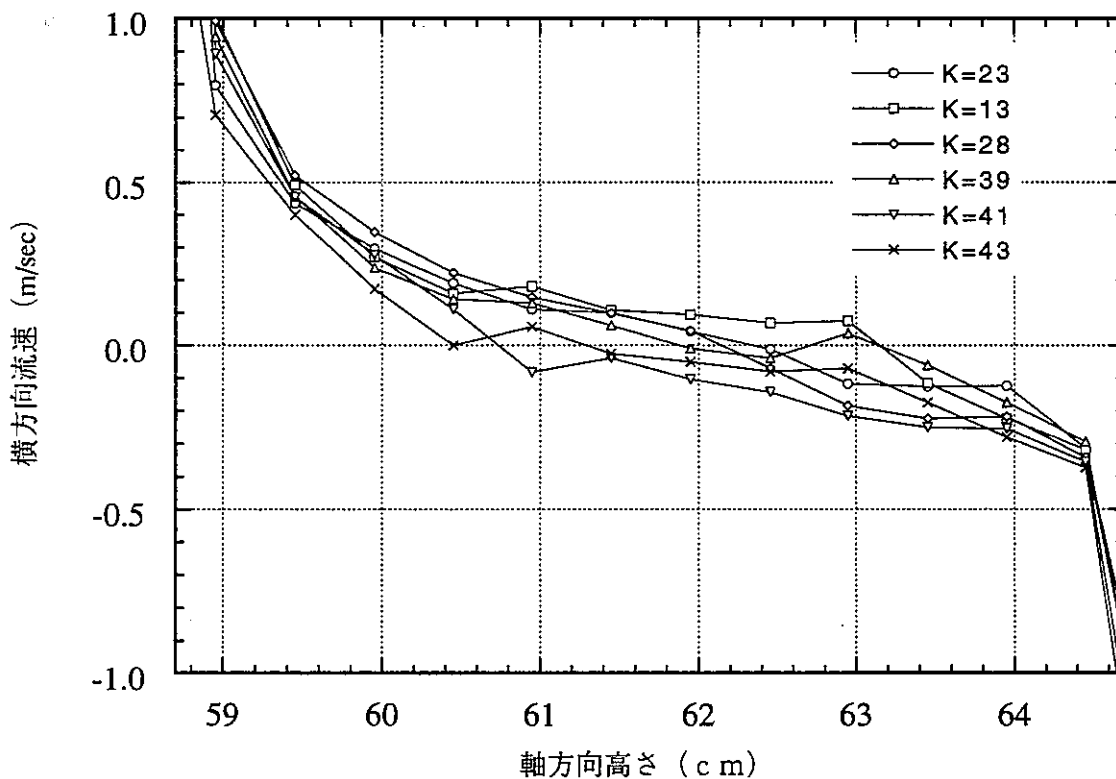
図A4-8 冷却材軸方向流速分布 (ケース 2)



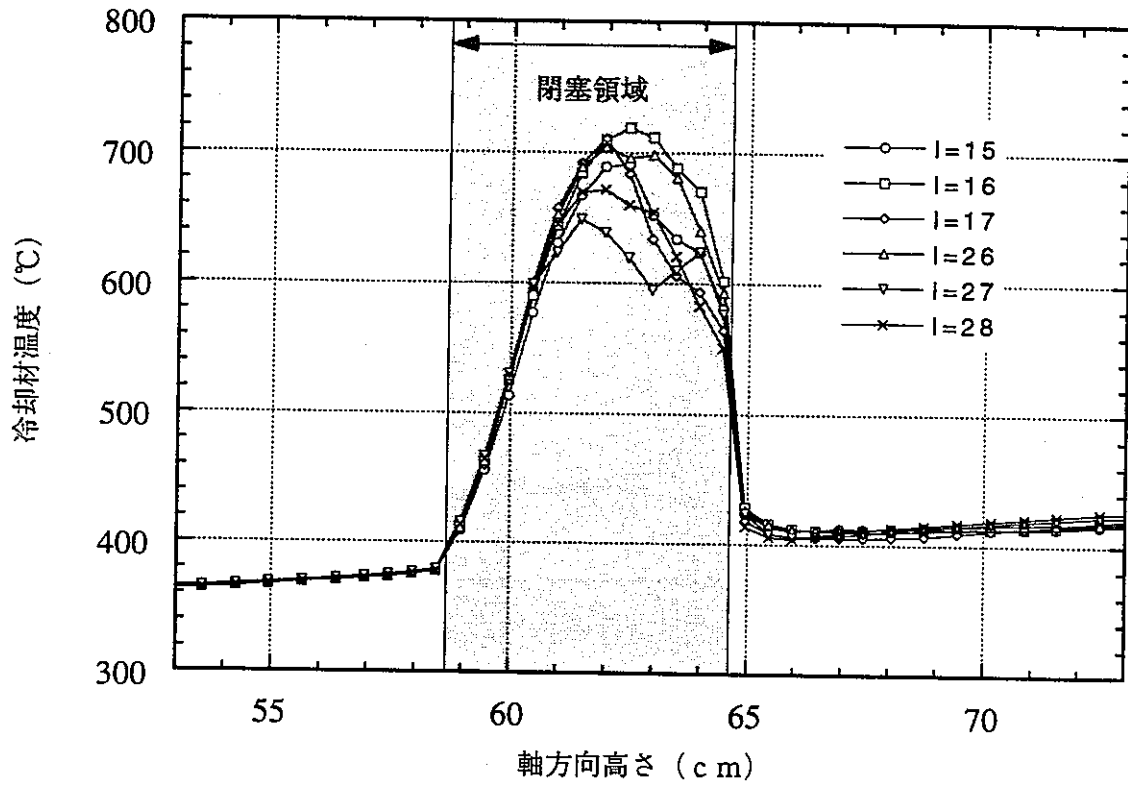
図A4-9 冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース 2)



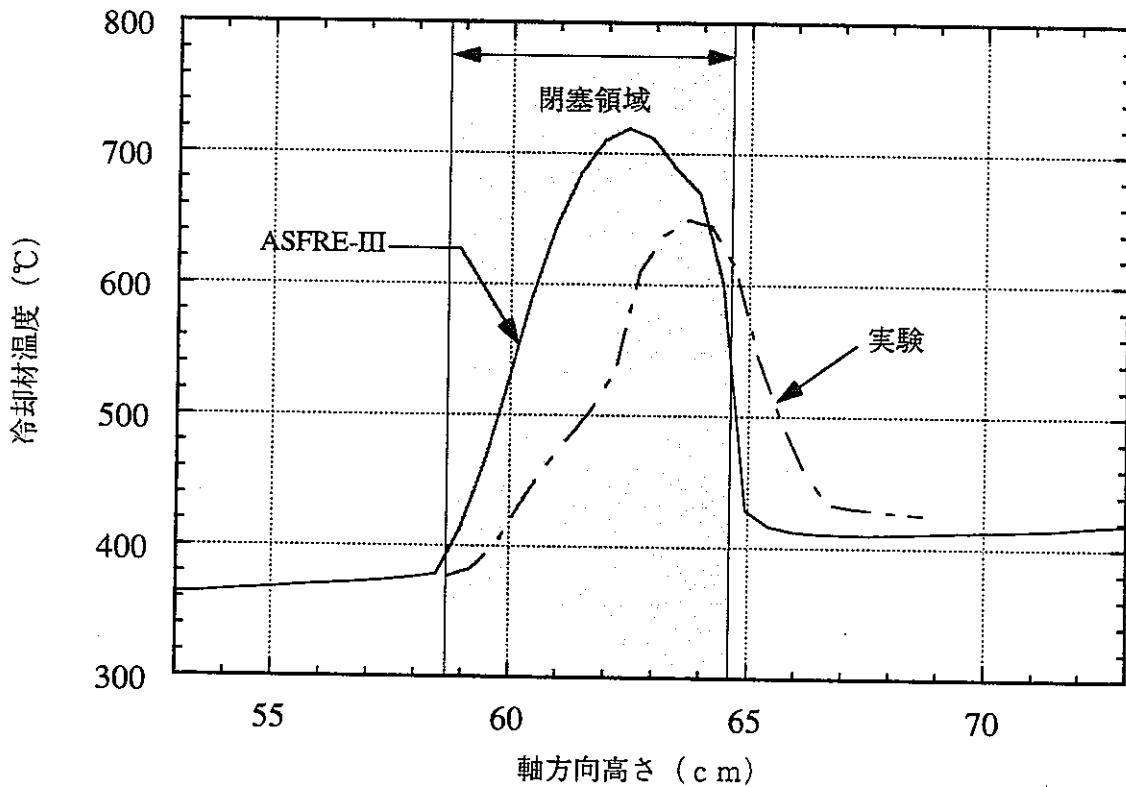
図A4-10 冷却材横方向流速分布 (ケース2)



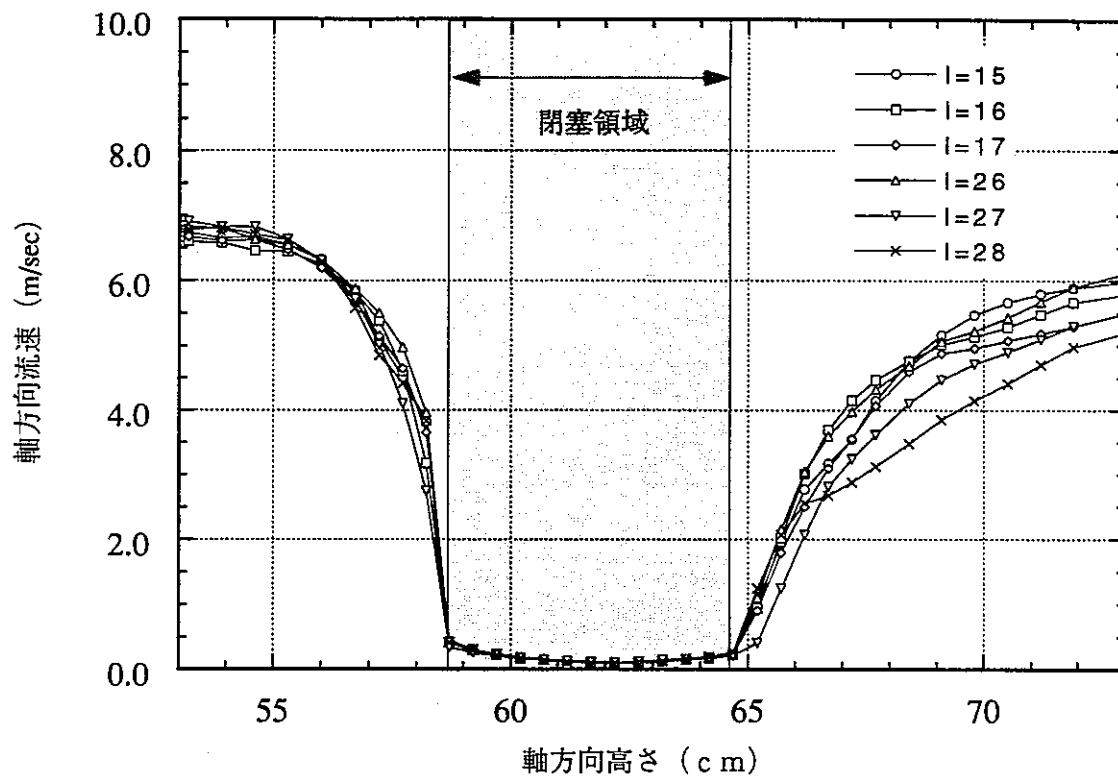
図A4-11 冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース2)



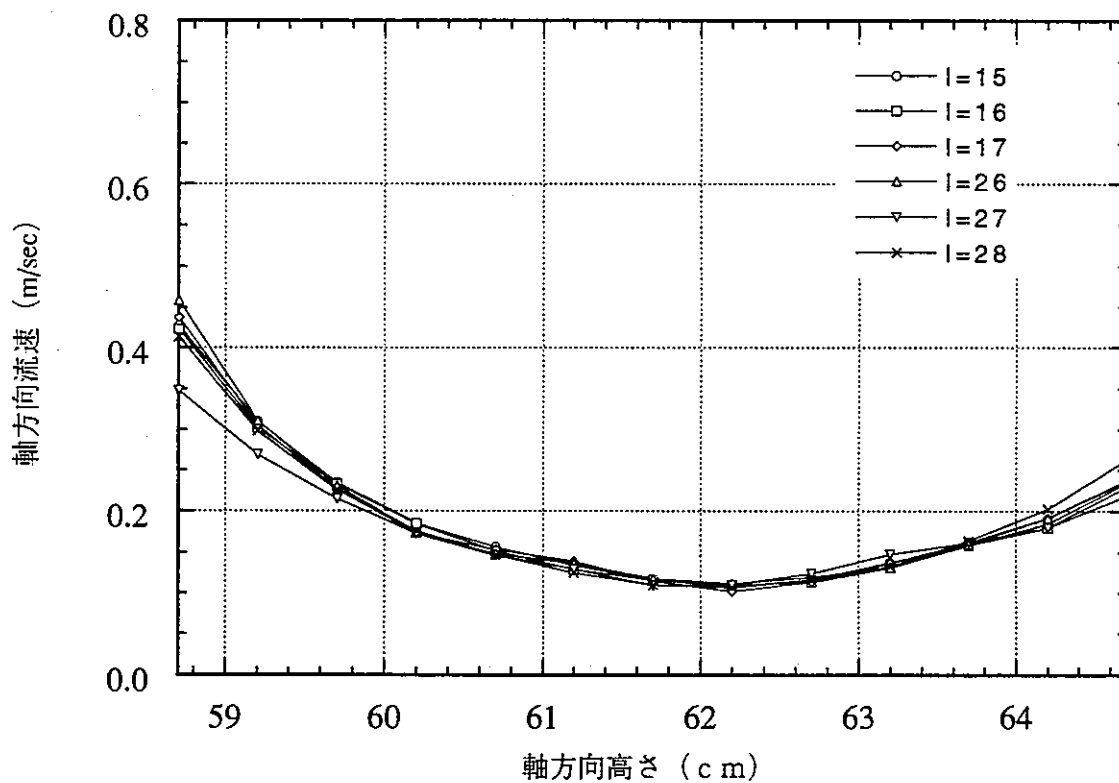
図A4-12 冷却材軸方向温度分布 (ケース2)



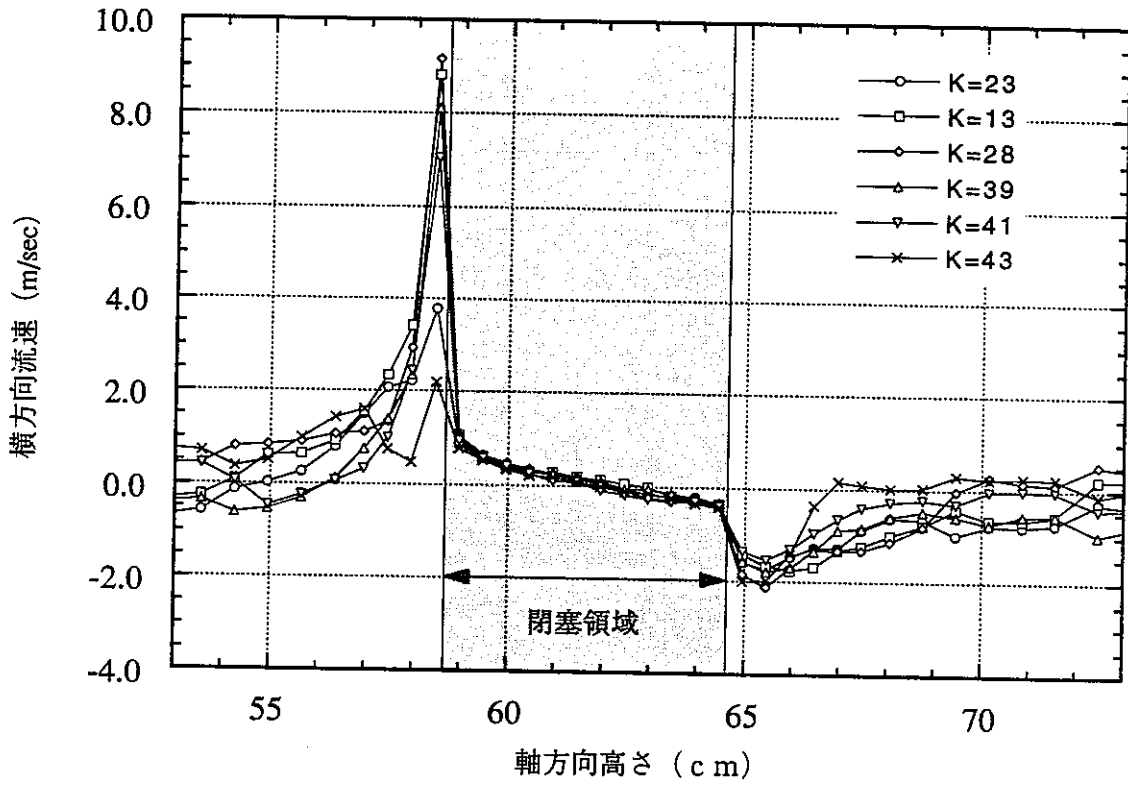
図A4-13 冷却材軸方向温度分布 (ケース2)



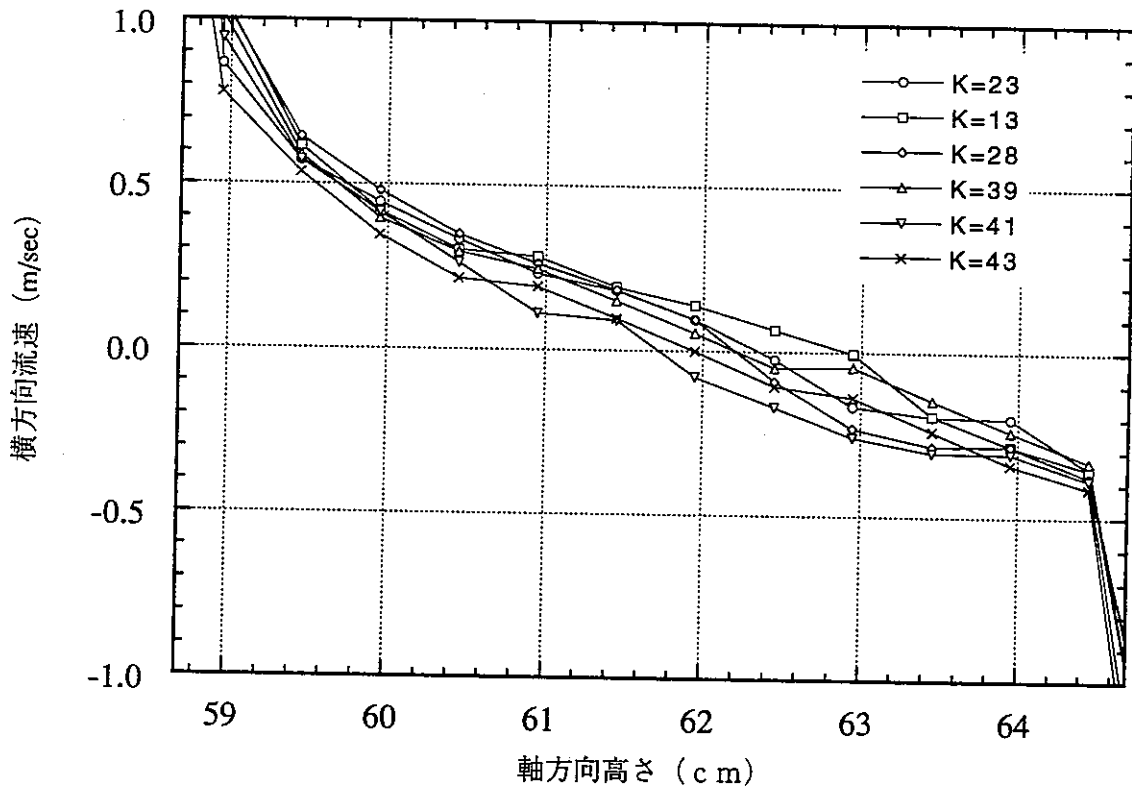
図A4-14 冷却材軸方向流速分布 (ケース3)



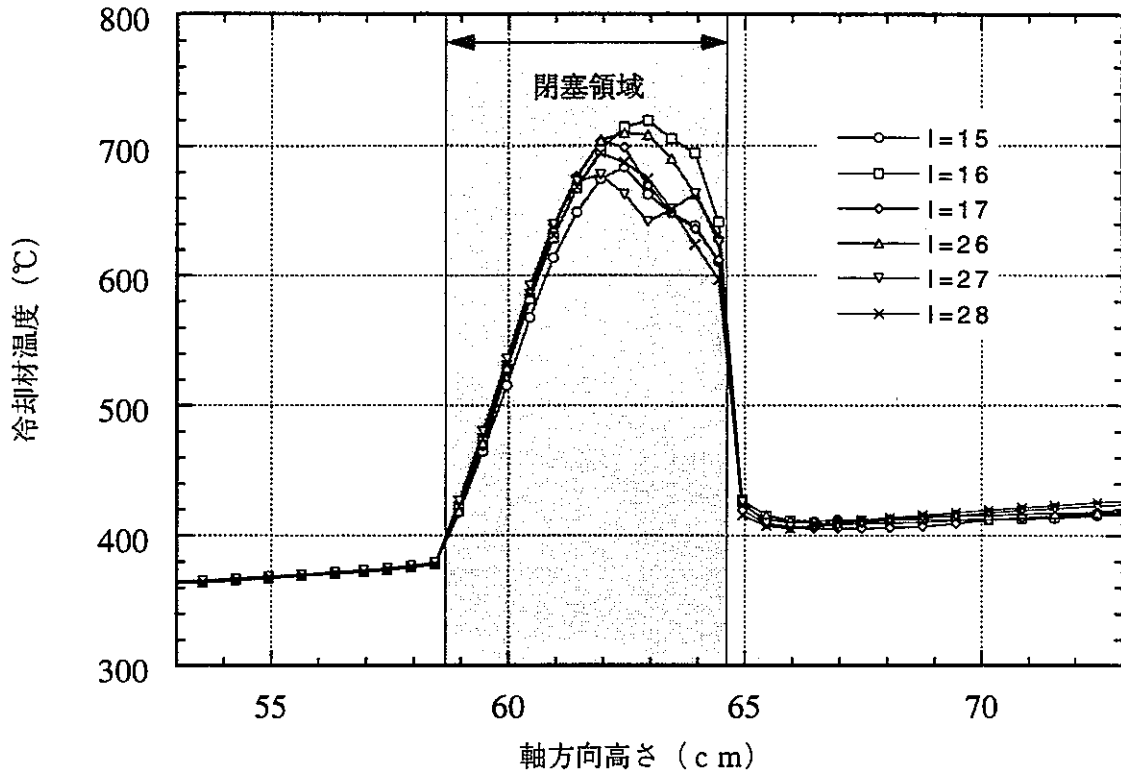
図A4-15 冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース3)



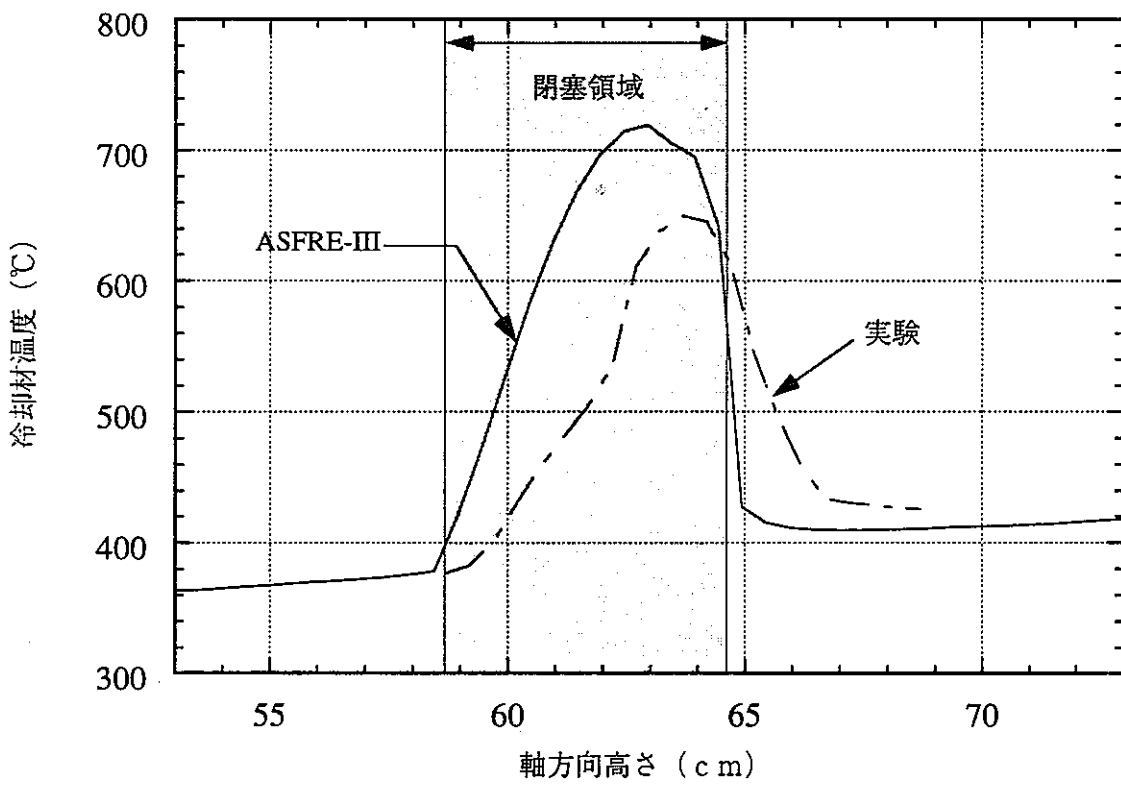
図A4-16 冷却材横方向流速分布 (ケース3)



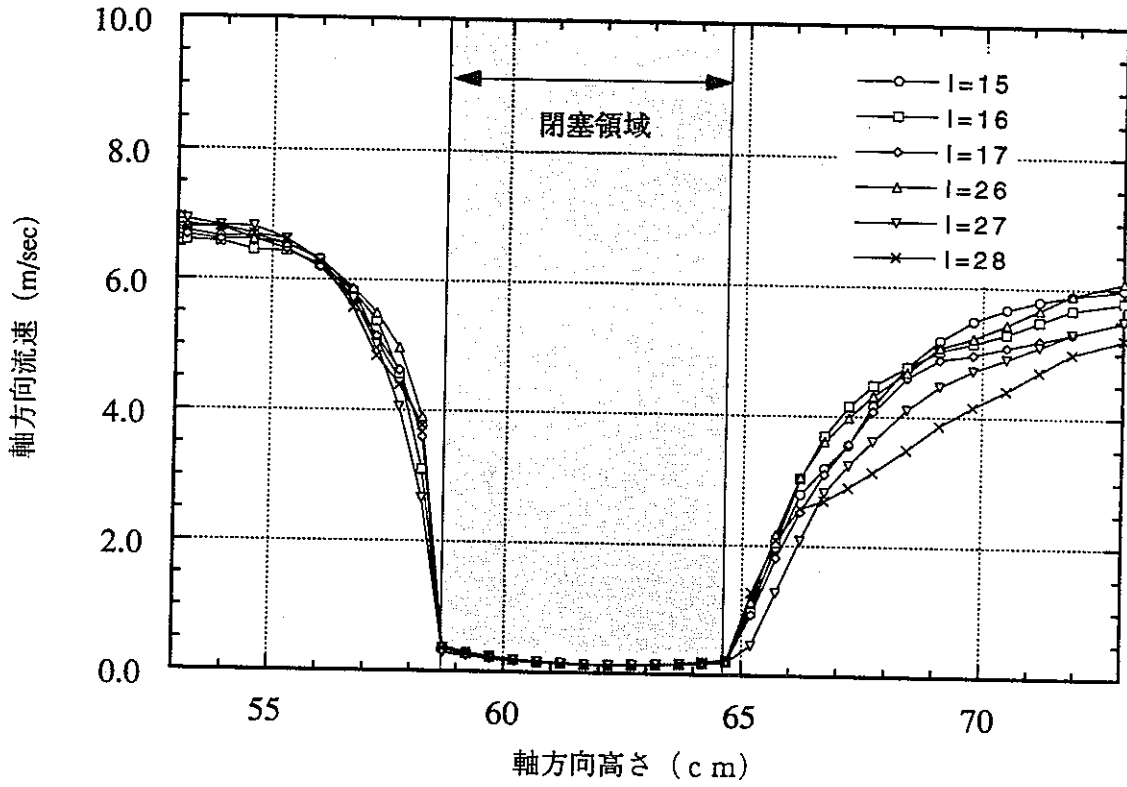
図A4-17 冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース3)



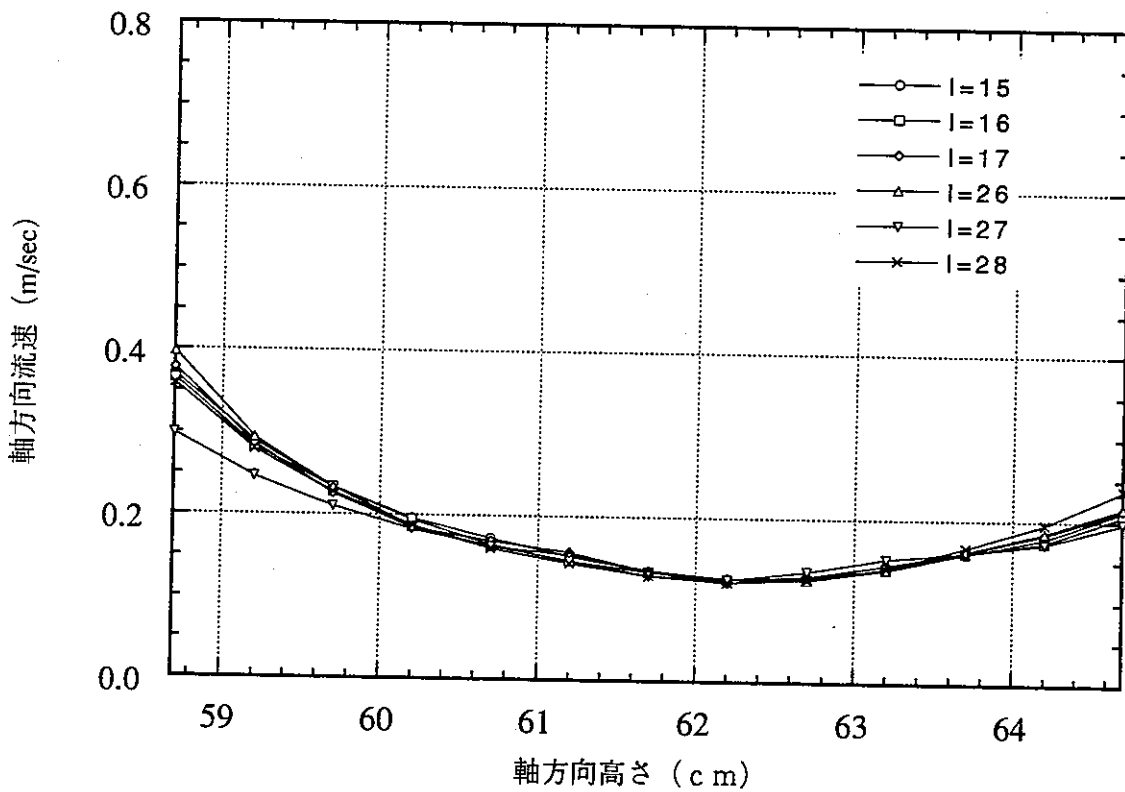
図A4-18 冷却材軸方向温度分布 (ケース3)



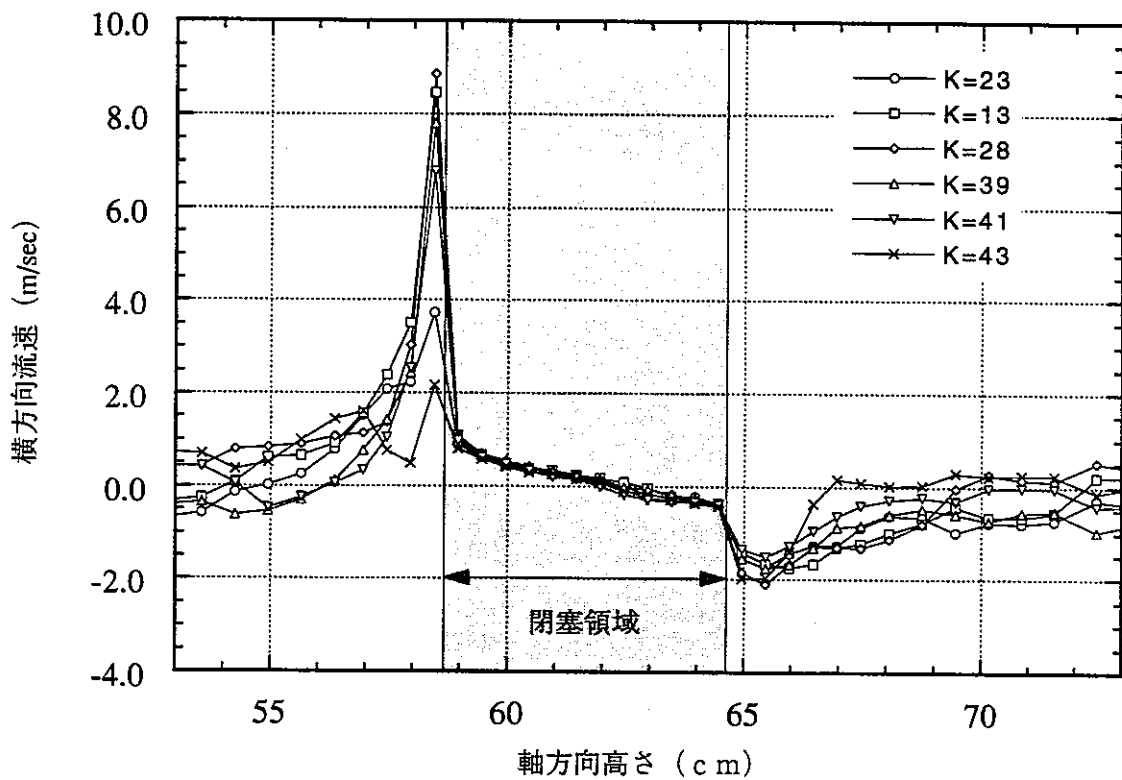
図A4-19 冷却材軸方向温度分布 (ケース3)



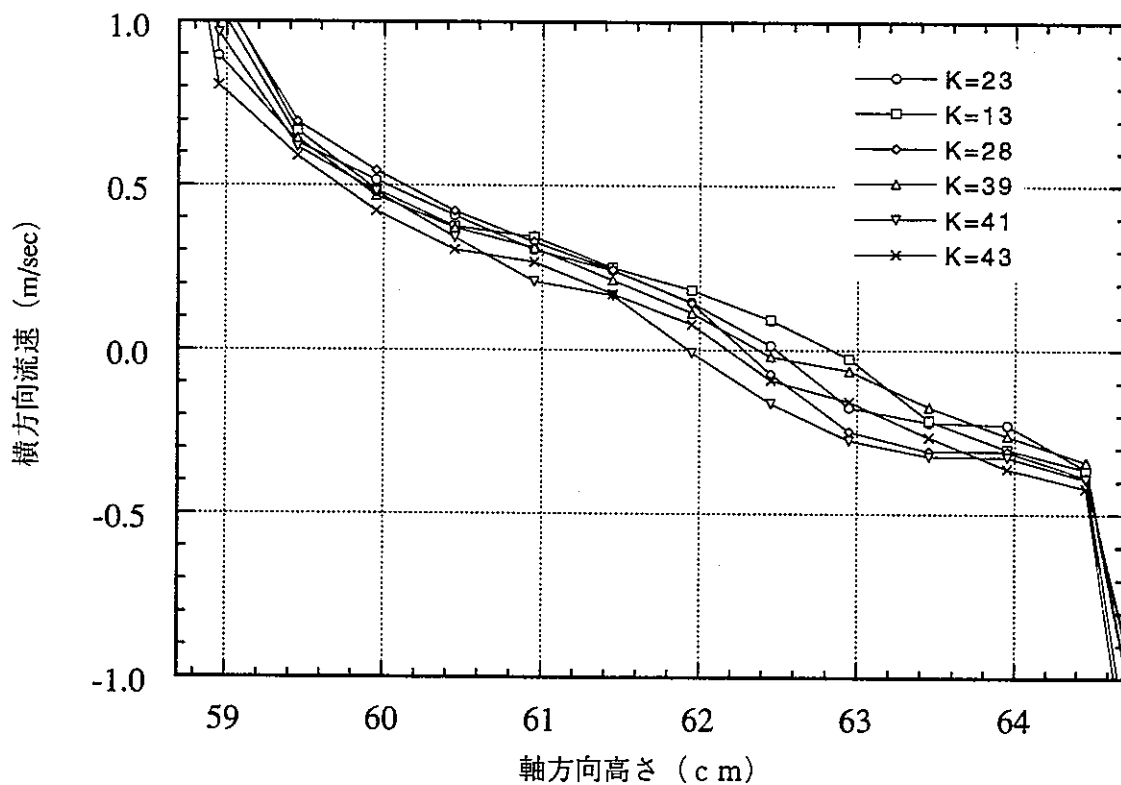
図A4-20 冷却材軸方向流速分布 (ケース4)



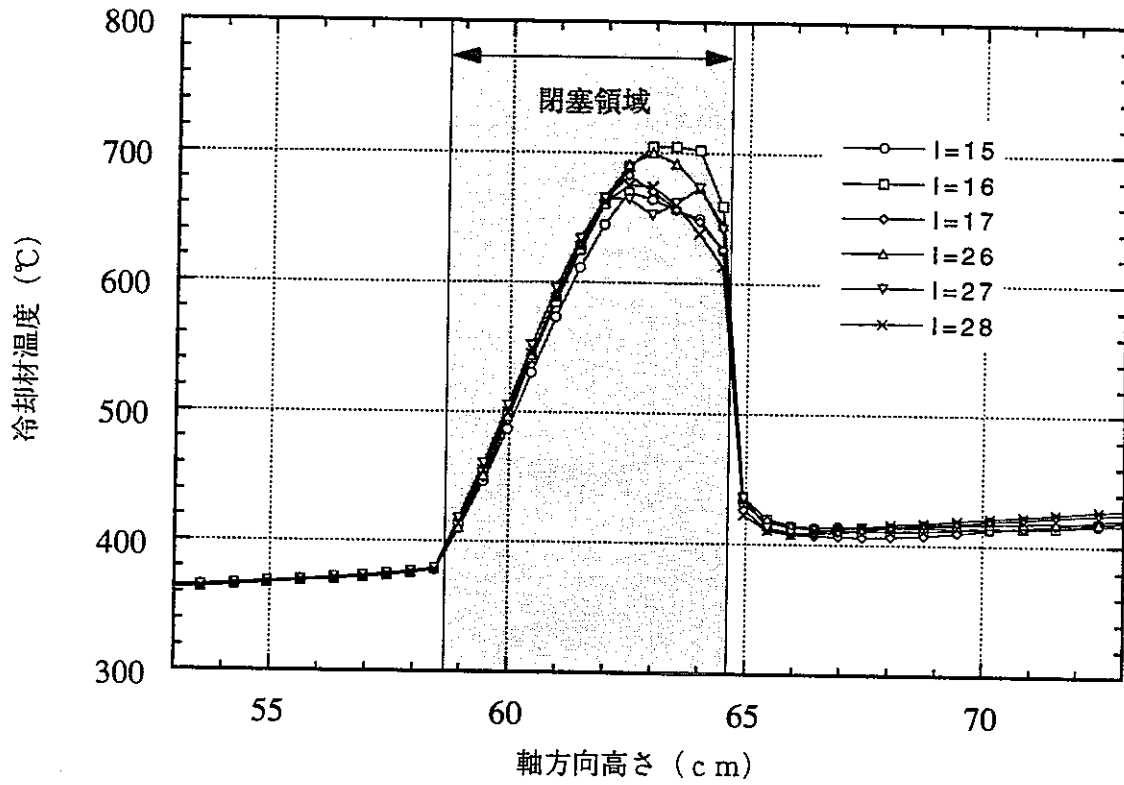
図A4-21 冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース4)



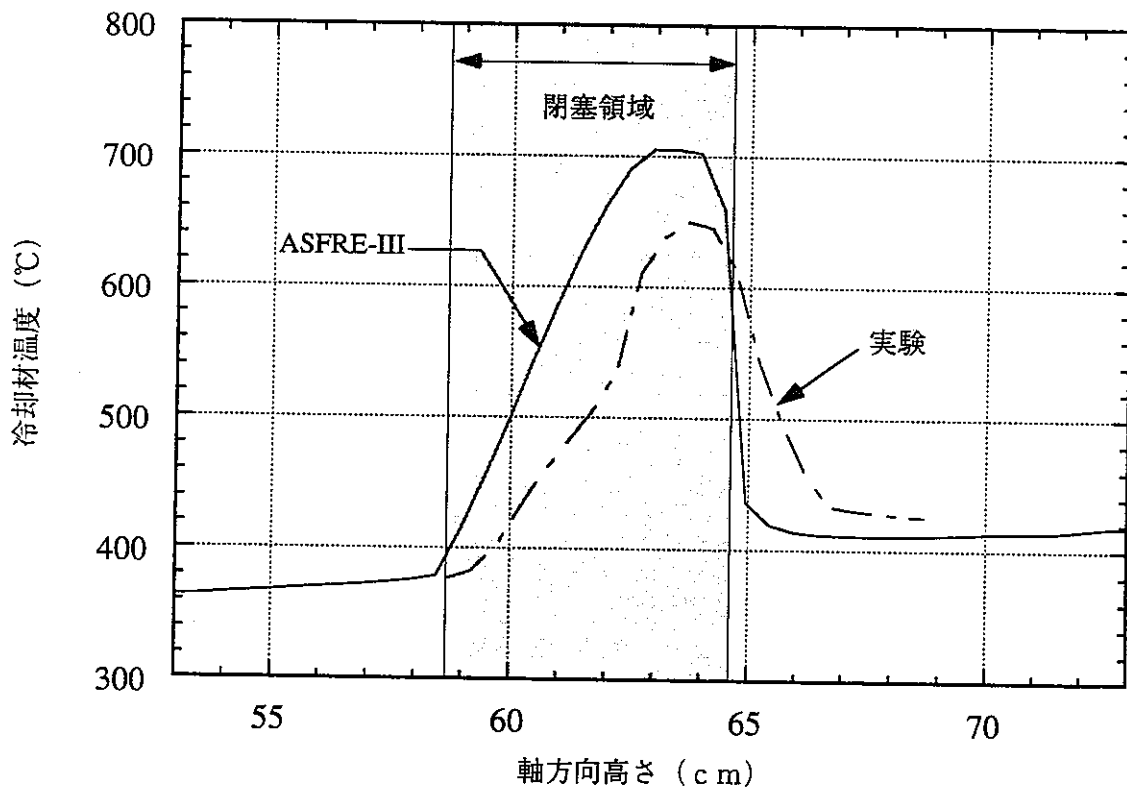
図A4-22 冷却材横方向流速分布 (ケース4)



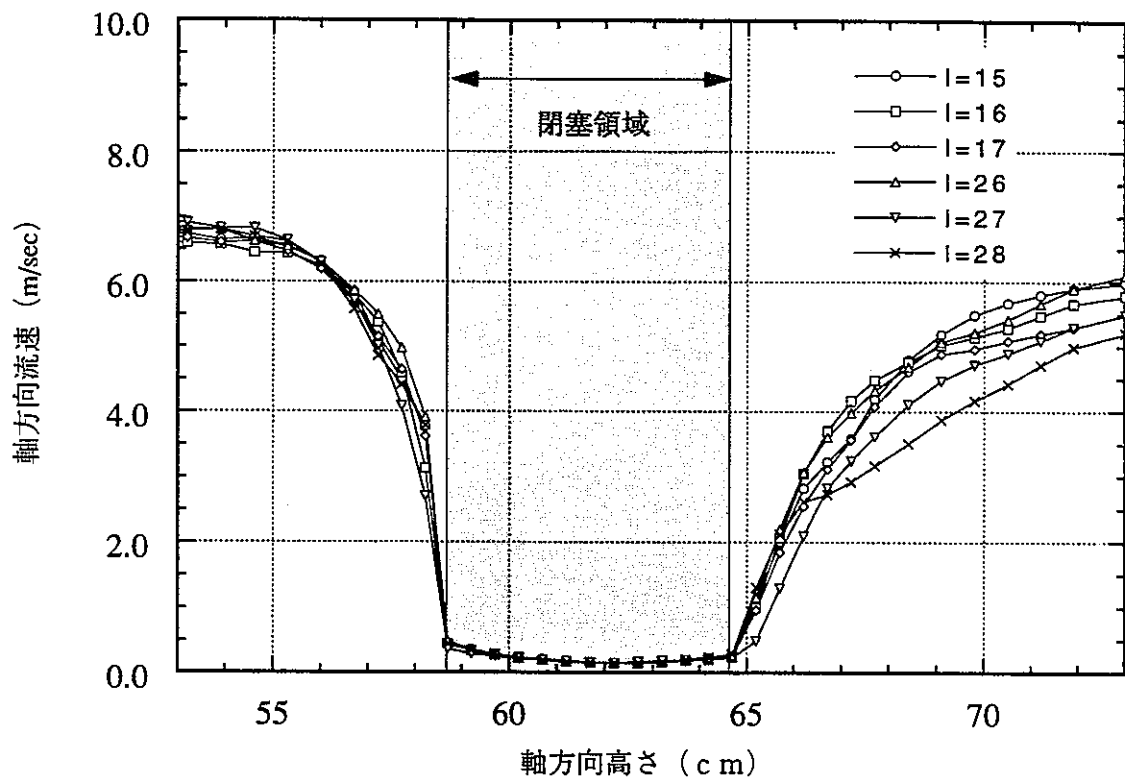
図A4-23 冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース4)



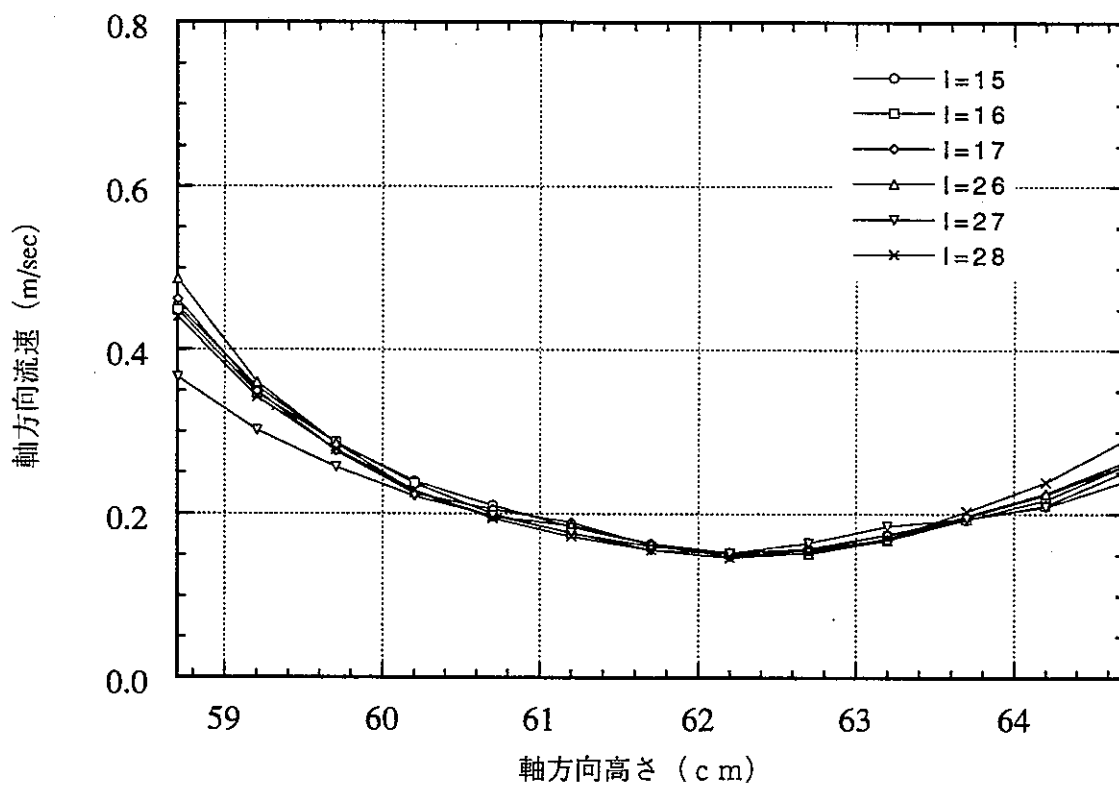
図A4-24 冷却材軸方向温度分布 (ケース4)



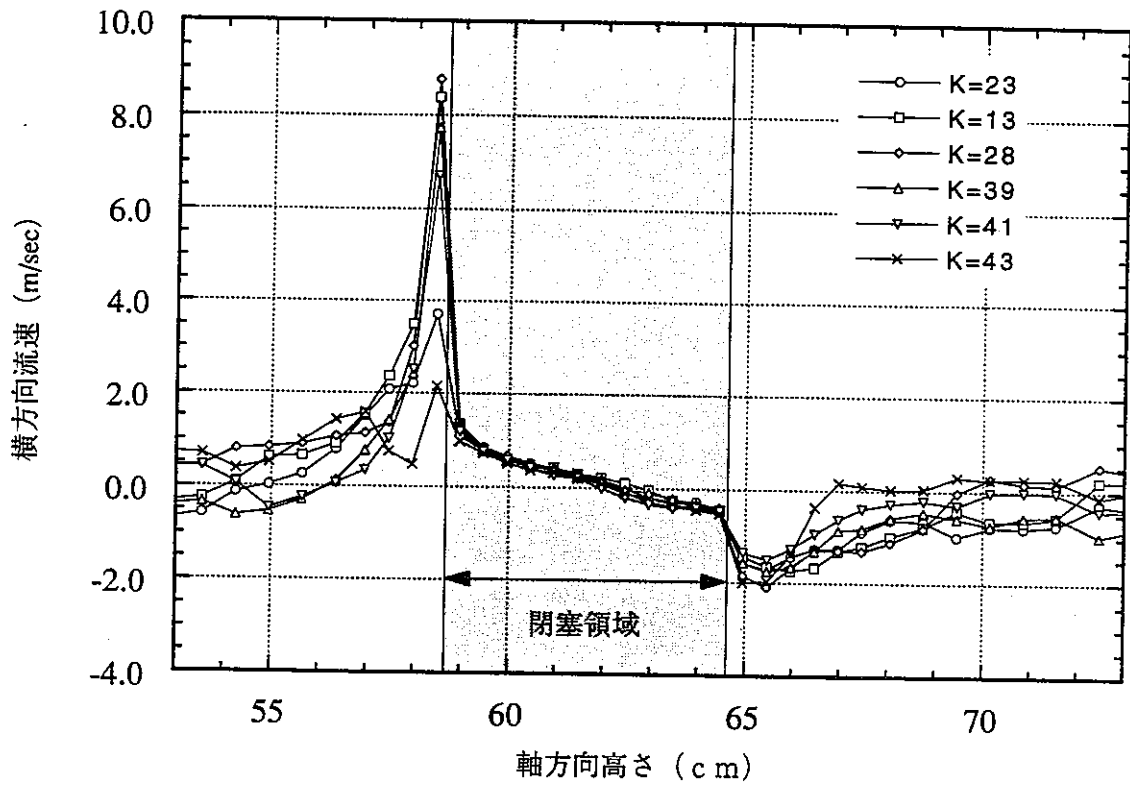
図A4-25 冷却材軸方向温度分布 (ケース4)



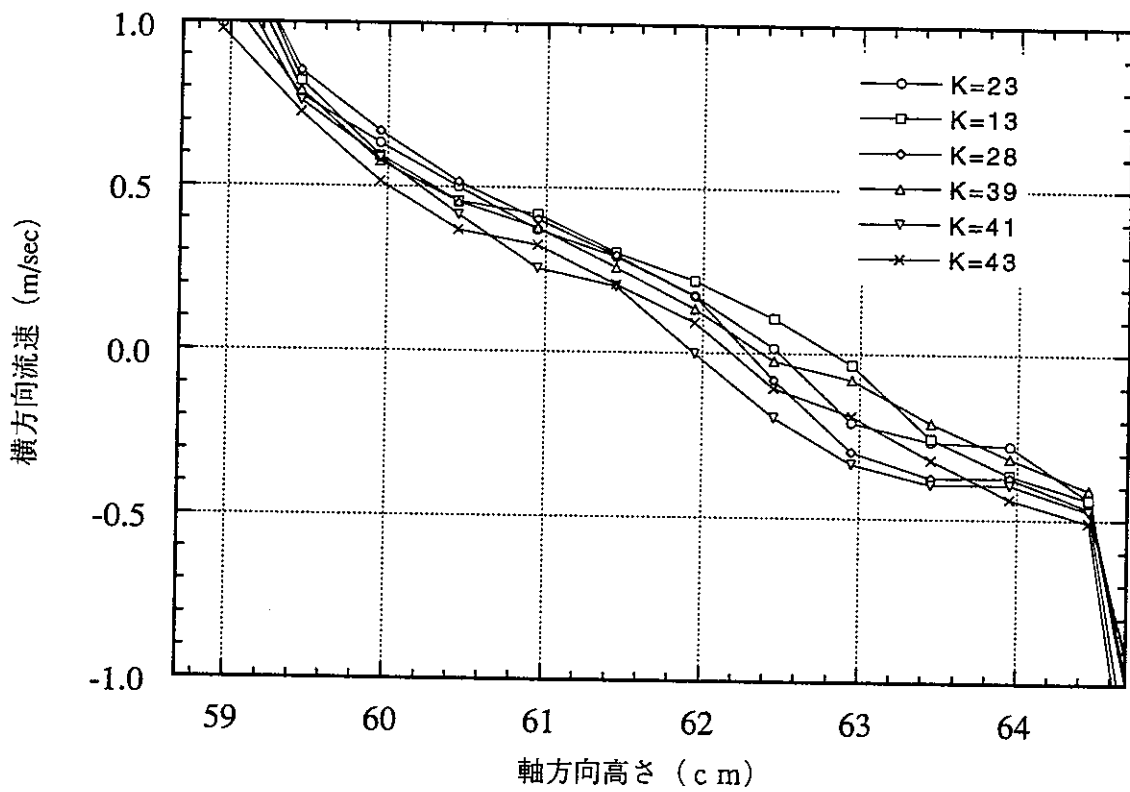
図A4-26 冷却材軸方向流速分布 (ケース 5)



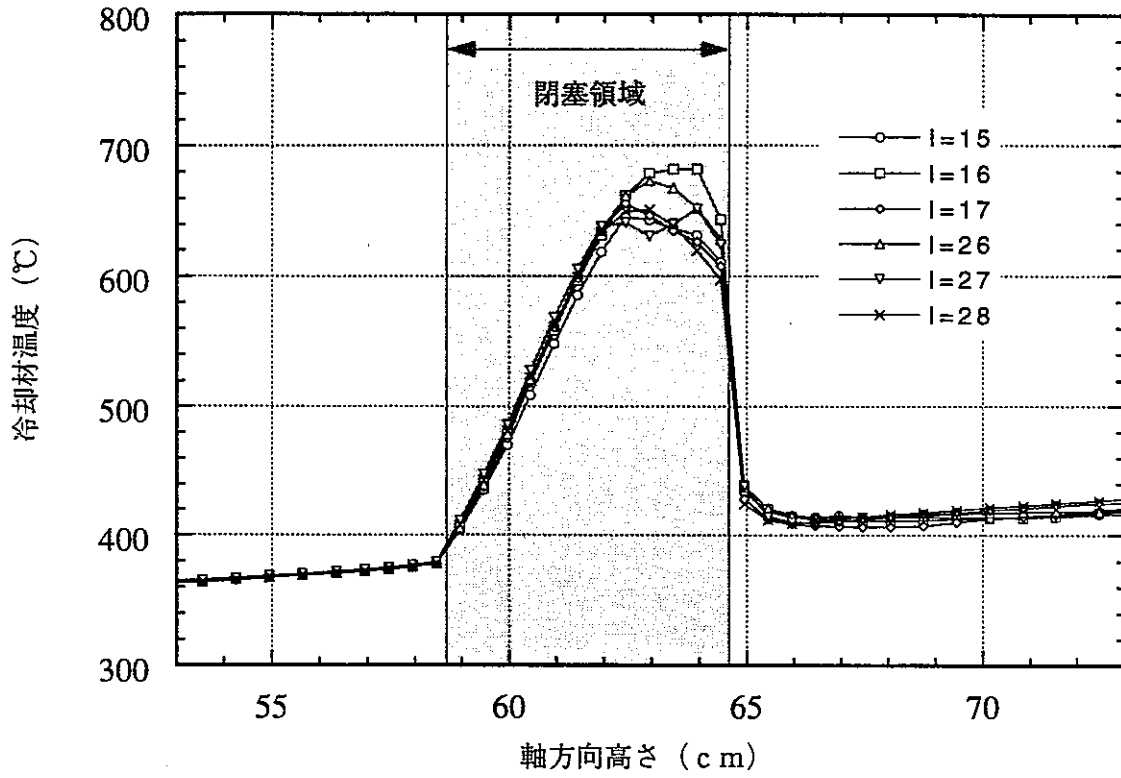
図A4-27 冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース 5)



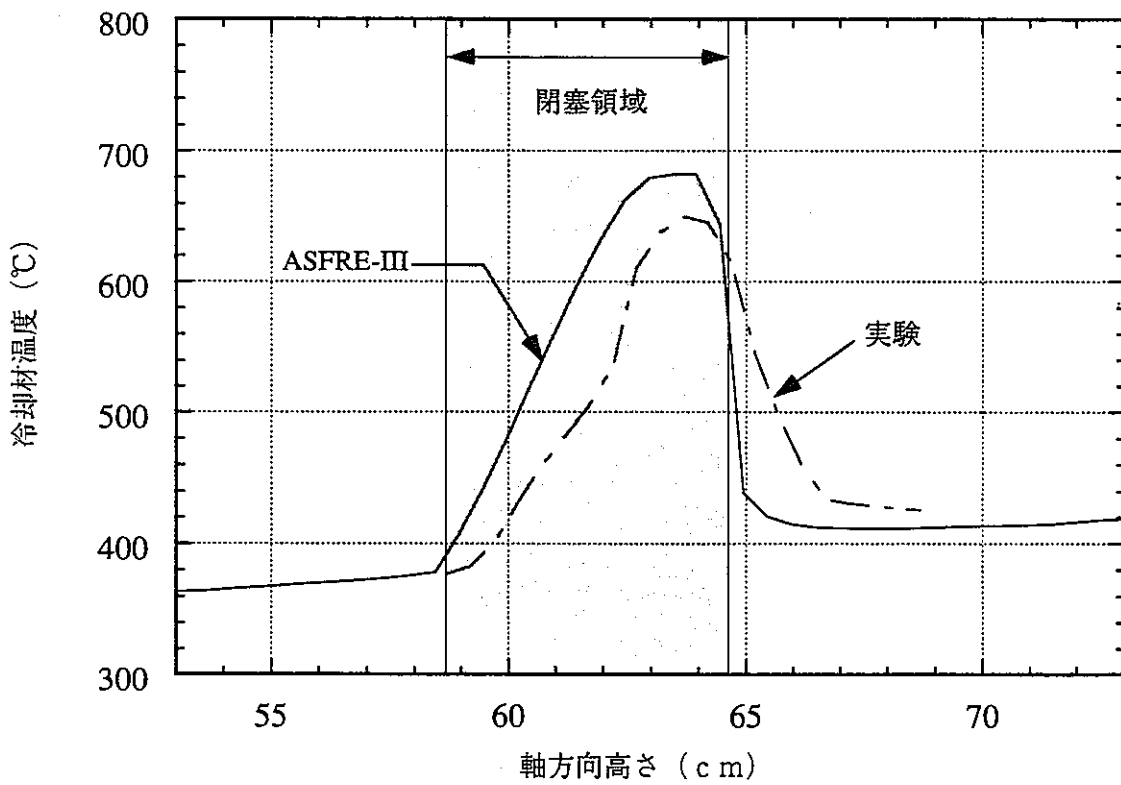
図A4-28 冷却材横方向流速分布 (ケース5)



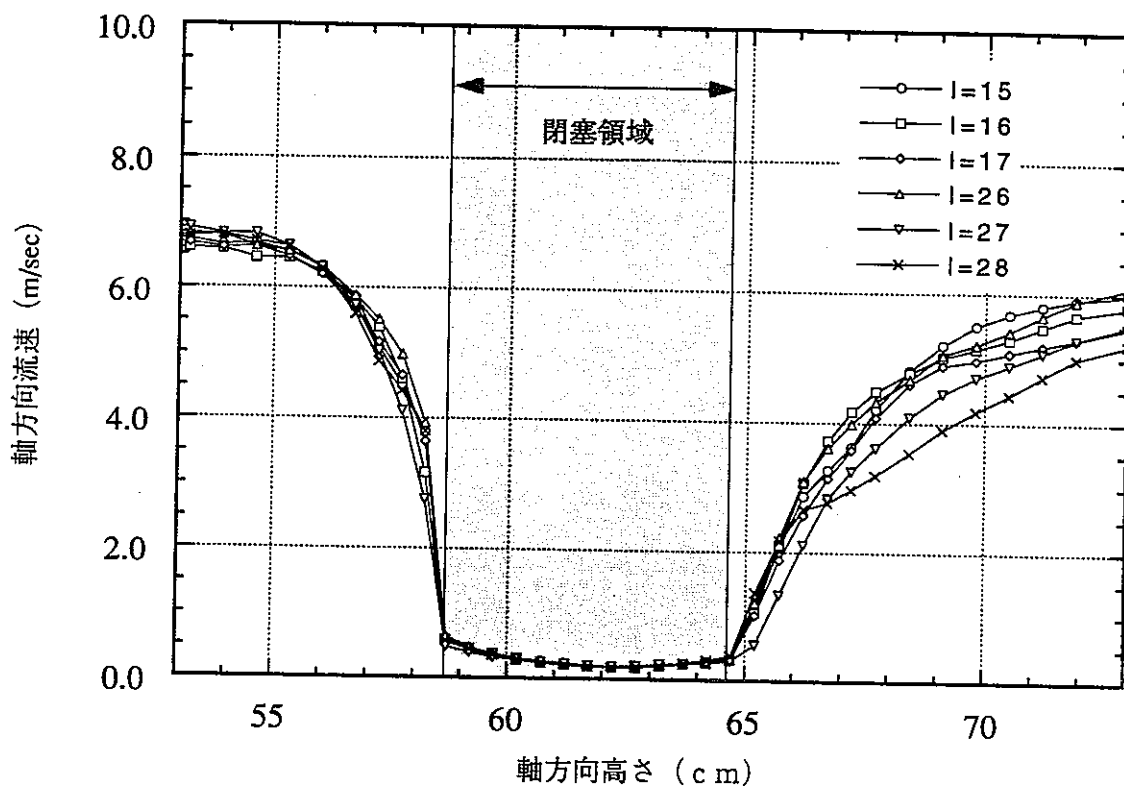
図A4-29 冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース5)



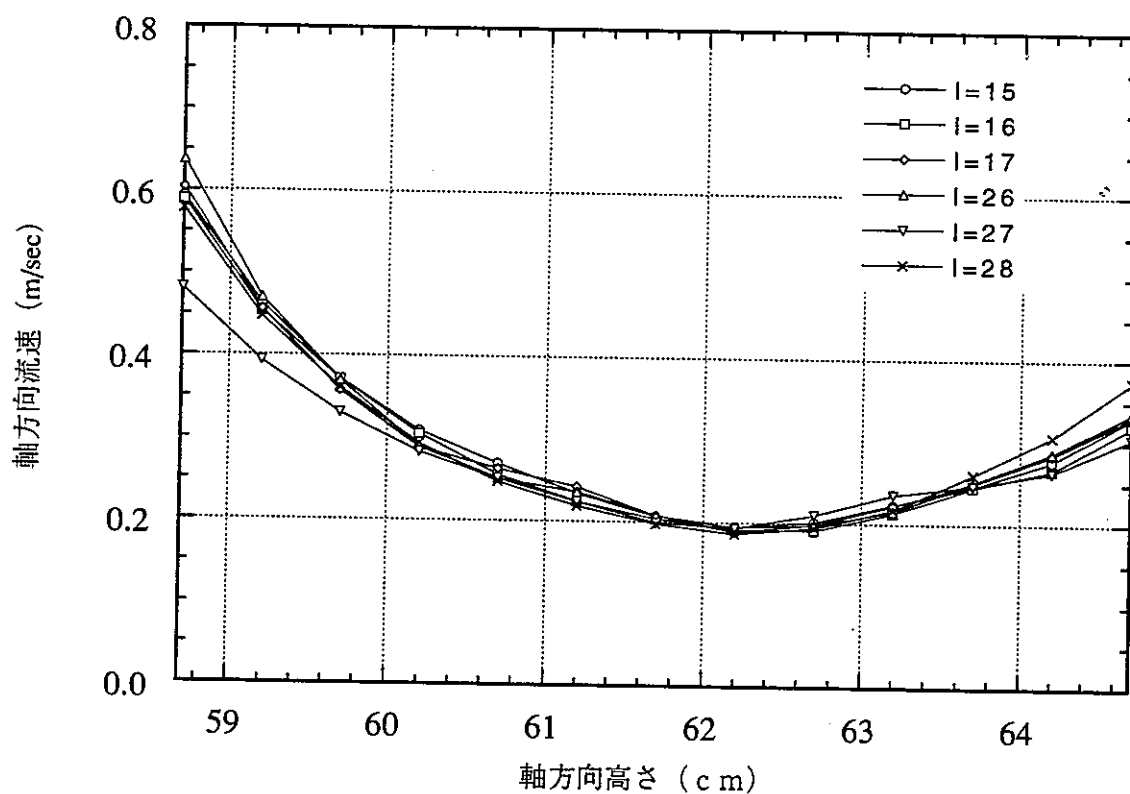
図A4-30 冷却材軸方向温度分布 (ケース5)



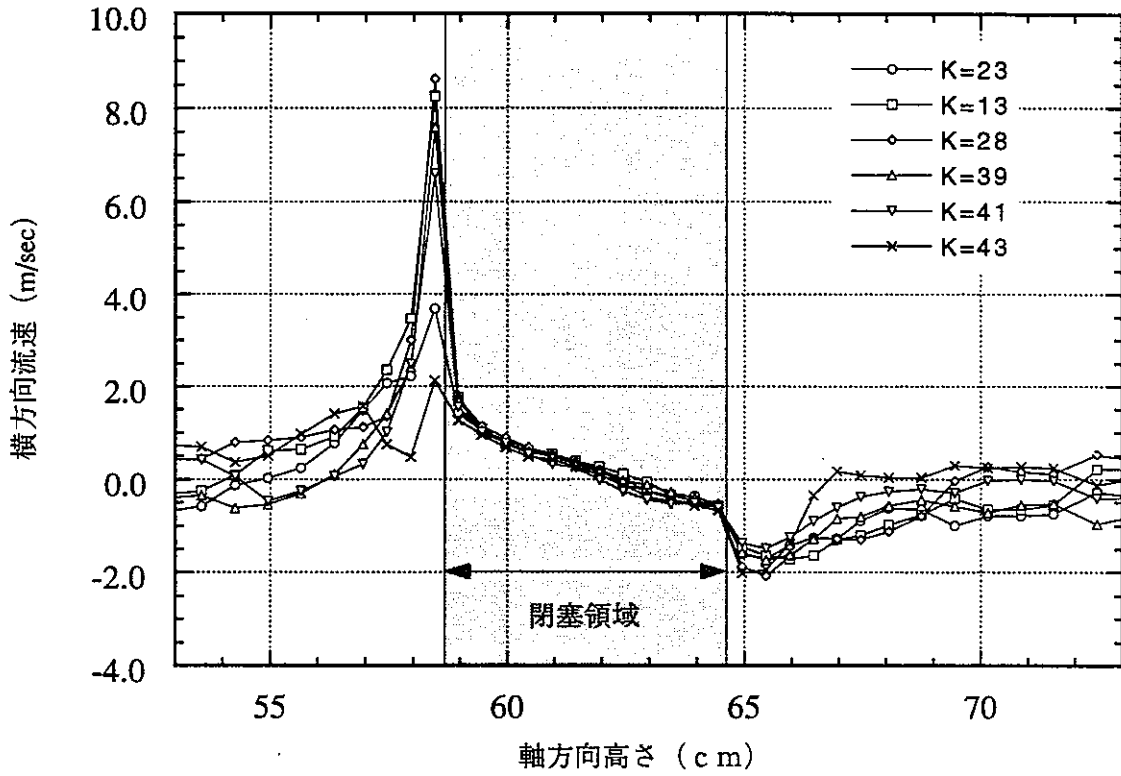
図A4-31 冷却材軸方向温度分布 (ケース5)



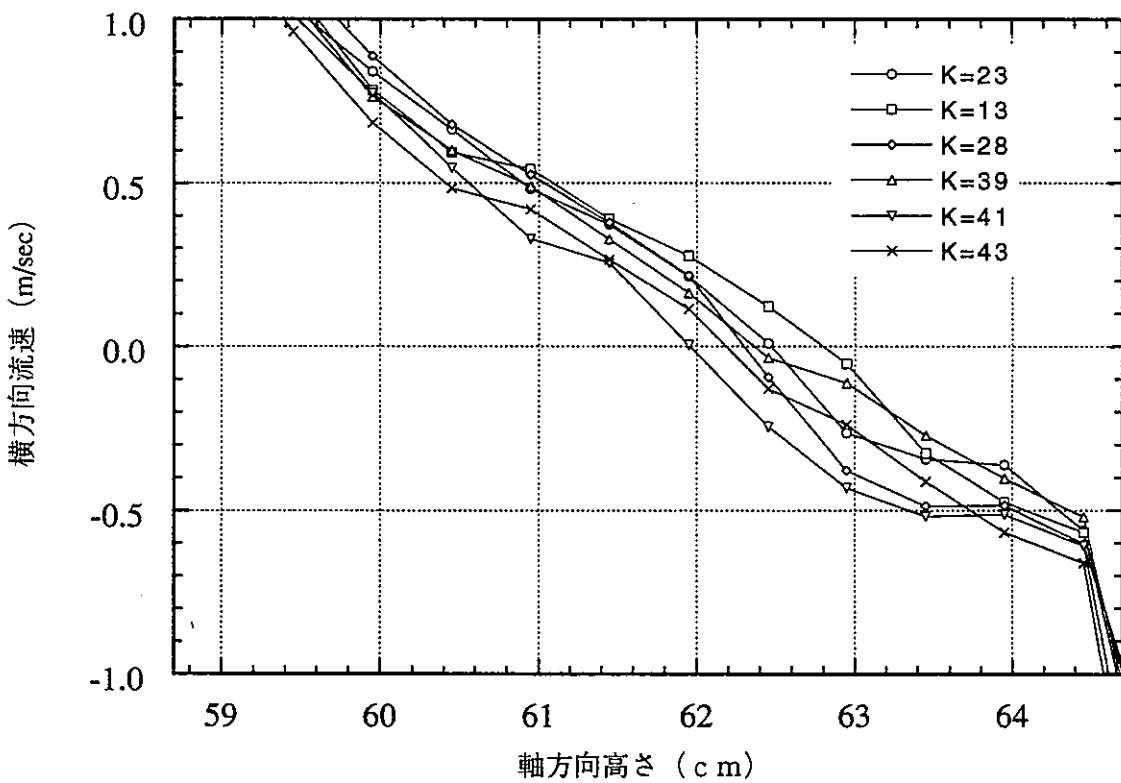
図A4-32 冷却材軸方向流速分布 (ケース6)



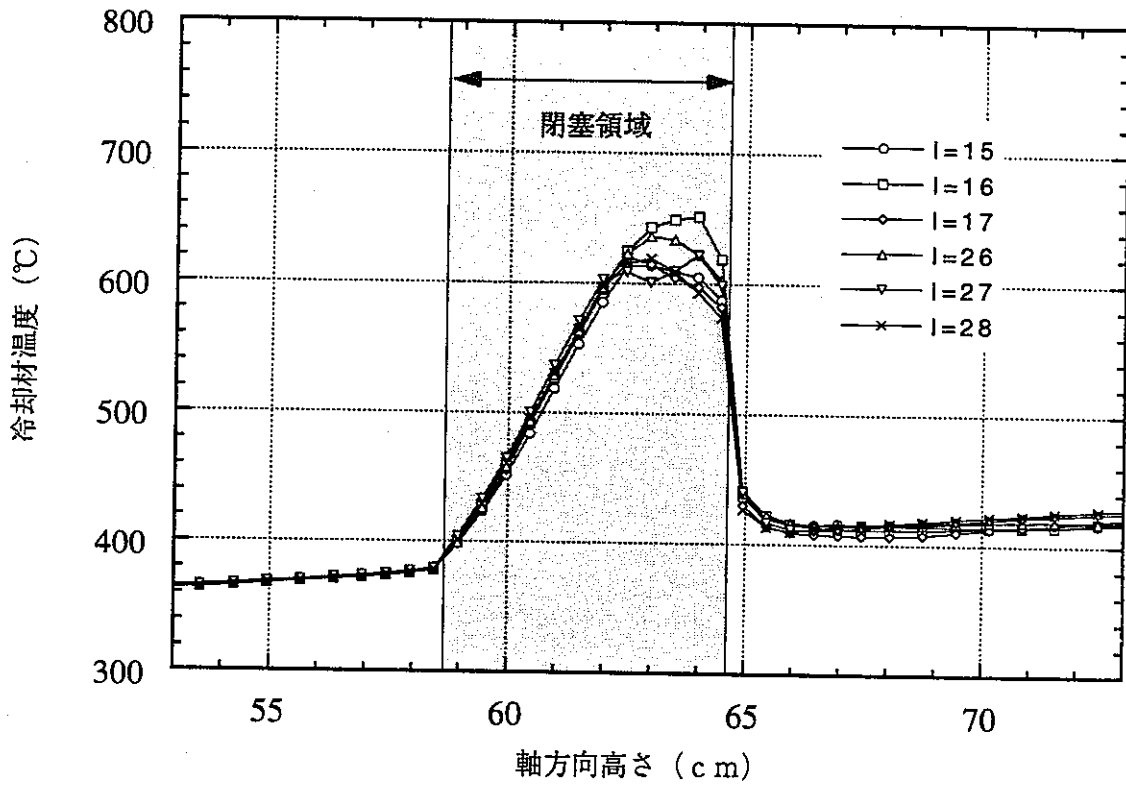
図A4-33 冷却材軸方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース6)



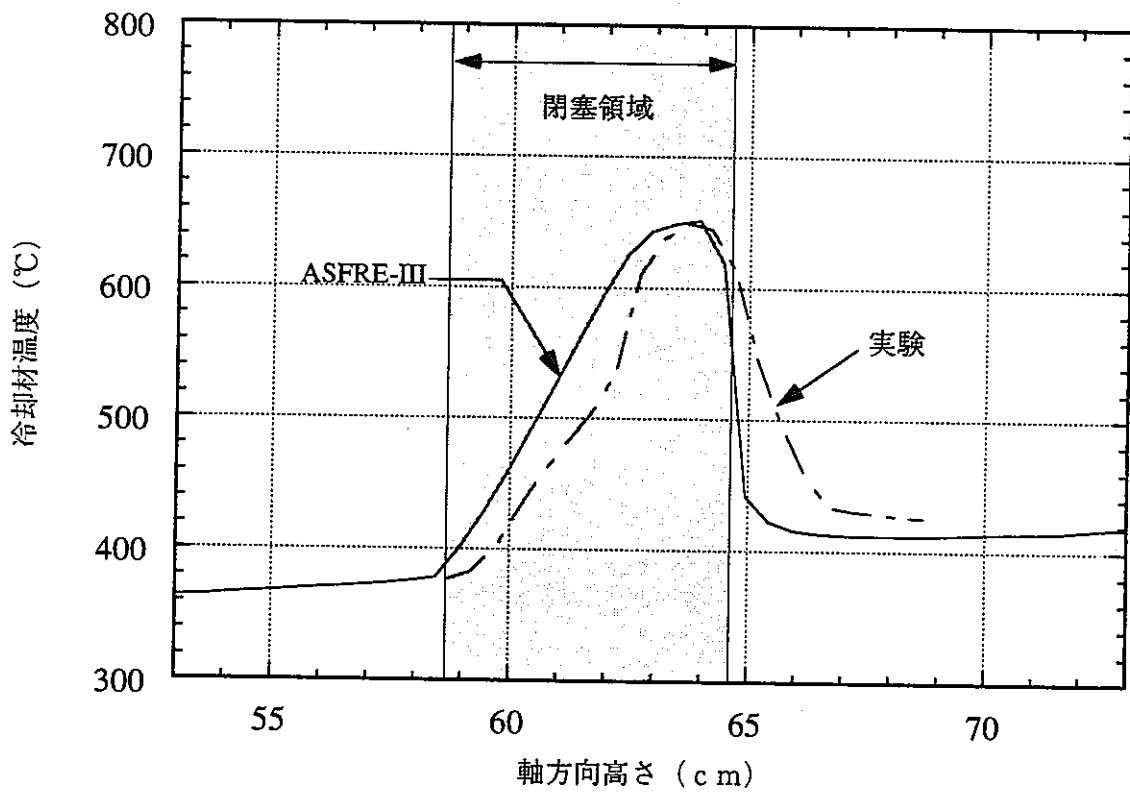
図A4-34 冷却材横方向流速分布 (ケース 6)



図A4-35 冷却材横方向流速分布閉塞領域拡大図 (ケース 6)



図A4-36 冷却材軸方向温度分布 (ケース6)



図A4-37 冷却材軸方向温度分布 (ケース6)

< 付録 5 >

検証解析用入力データリスト

SCARLET 19-PIN BUNDLE (6 SUBCHANNEL POROUS BLOCKAGE)

112	42	60	19	0	2	0	1	13	6	112
0	100		0.0	1000	1	0				
2	0		1.0E-8		1.0E-8		1.0E-8			
0	1		1	1	2					
1	112									
8.5E-3			9.79E-3		3.0E-6		5.54E-3			
400.00			2600.00							
-9.8070			3.141593		1.00					
0.0600			1.3000		1.0000		1.0000	1.0000	1.4000	
1.0000			1.0E-9		1.0E-10		1.0000	1.9000	1.0000	
9										
1.5000E-02		1	12	4	1					
1.5000E-02		13	46	4	1					
1.1000E-02		47	48	4	1					
7.0000E-03		49	53	4	1					
5.0000E-03		54	75	4	1					
7.0000E-03		76	81	4	1					
1.1000E-02		82	82	4	1					
1.5000E-02		83	100	4	1					
1.5000E-02		101	112	4	1					
42										
1	3	0	5	2	0					
2	2	0	7	1	3					
3	2	0	9	2	4					
4	3	0	3	11	0					
5	2	0	1	12	6					
6	1	0	14	5	7					
7	1	0	2	6	8					
8	1	0	16	7	9					
9	1	0	3	8	10					
10	1	0	18	9	11					
11	2	0	4	10	20					
12	2	0	5	22	13					
13	1	0	24	12	14					
14	1	0	6	13	15					
15	1	0	26	14	16					
16	1	0	8	15	17					
17	1	0	28	16	18					
18	1	0	10	17	19					
19	1	0	30	18	20					
20	2	0	11	19	21					
21	3	0	31	20	0					
22	3	0	12	23	0					
23	2	0	32	22	24					
24	1	0	13	23	25					
25	1	0	33	24	26					
26	1	0	15	25	27					
27	1	0	35	26	28					
28	1	0	17	27	29					
29	1	0	37	28	30					
30	1	0	19	29	31					
31	2	0	38	30	21					
32	2	0	39	23	33					
33	1	0	25	32	34					
34	1	0	40	33	35					
35	1	0	27	34	36					
36	1	0	41	35	37					
37	1	0	29	36	38					
38	2	0	42	37	31					
39	3	0	32	40	0					
40	2	0	34	39	41					
41	2	0	36	40	42					
42	3	0	38	41	0					
1	43	11	0	0						
2	43	11	0	0						
3	43	11	0	0						
4	44	0	5	6						
5	39	7	3	0						

6	40	1	5	0
7	44	0	3	5
8	41	1	3	5
9	44	0	3	5
10	42	6	3	0
11	43	11	0	0
12	43	11	0	0
13	43	11	0	0
14	43	11	0	0
15	43	11	0	0
16	44	0	5	6
17	32	2	2	3
18	33	1	0	0
19	34	2	0	0
20	35	1	0	0
21	36	2	0	0
22	37	1	0	0
23	38	2	5	0
24	44	0	3	6
25	43	11	0	0
26	43	11	0	0
27	43	11	0	0
28	22	3	6	0
29	23	2	2	0
30	24	1	0	0
31	25	2	0	0
32	26	1	0	0
33	27	2	0	0
34	28	1	0	0
35	29	2	0	0
36	30	1	0	0
37	31	2	2	5
38	44	0	3	6
39	43	11	0	0
40	43	11	0	0
41	44	0	2	5
42	12	1	3	6
43	13	2	0	0
44	14	1	0	0
45	15	2	0	0
46	16	1	0	0
47	17	2	0	0
48	18	1	0	0
49	19	2	0	0
50	20	1	6	0
51	21	4	2	0
52	43	11	0	0
53	43	11	0	0
54	43	11	0	0
55	44	0	2	5
56	5	1	3	0
57	6	2	0	0
58	7	1	0	0
59	8	2	0	0
60	9	1	0	0
61	10	2	0	0
62	11	1	5	6
63	44	0	2	3
64	43	11	0	0
65	43	11	0	0
66	43	11	0	0
67	43	11	0	0
68	43	11	0	0
69	1	5	5	0
70	44	0	3	5
71	2	2	3	5
72	44	0	3	5
73	3	2	3	0
74	4	7	5	0

75	44	0	2	3							
76	43	11	0	0							
77	43	11	0	0							
78	43	11	0	0							
-6	1	1	-5	6	1	-1	1	-1	1	-4	6
1	-1	1	-1	1	-1	1	-4	9	6	-7	-1
1	-1	1	-1	1	-1	9	-7	-1	1	-1	1
-1	9	7	-1	-1	-9						
5	-5	-5	4	-6	-2	-3	-2	-3	-2	-3	-6
-2	-3	-2	-3	-2	-3	-2	-3	-4	-7	7	-3
-2	-3	-2	-3	-2	-3	-2	7	-3	-2	-3	-2
-3	-2	-8	8	8	8						
0	5	5	0	2	3	2	3	2	3	4	2
3	2	3	2	3	2	3	4	0	0	3	2
3	2	3	2	3	2	-9	3	2	3	2	3
2	-9	0	-8	-8	0						
18											
1	2										
2	1										
3	1										
4	2										
5	1										
11	1										
12	1										
20	1										
21	2										
22	2										
23	1										
31	1										
32	1										
38	1										
39	2										
40	1										
41	1										
42	2										
1	2	0	8	9						240.0	
2	1	0	3	4						0.0	
3	2	4	11	12						270.0	
4	2	3	5	6						0.0	
5	4	6	14	15						270.0	
6	4	5	7	0						0.0	
7	6	0	17	18						300.0	
8	1	9	19	20						240.0	
9	1	8	10	11						330.0	
10	9	11	22	23						270.0	
11	9	10	3	12						30.0	
12	3	11	13	14						330.0	
13	12	14	25	26						270.0	
14	12	13	5	15						30.0	
15	5	14	16	17						330.0	
16	15	17	28	29						270.0	
17	15	16	7	18						30.0	
18	7	17	31	32						300.0	
19	8	20	34	0						240.0	
20	8	19	21	22						330.0	
21	20	22	36	37						270.0	
22	20	21	10	23						30.0	
23	10	22	24	25						330.0	
24	23	25	39	40						270.0	
25	23	24	13	26						30.0	
26	13	25	27	28						330.0	
27	26	28	42	43						270.0	
28	26	27	16	29						30.0	
29	16	28	30	31						330.0	
30	29	31	45	46						270.0	
31	29	30	18	32						30.0	
32	18	31	33	0						300.0	
33	32	0	46	47						240.0	
34	19	0	35	36						300.0	

35	34	36	48	49	300.0					
36	34	35	21	37	30.0					
37	21	36	38	39	330.0					
38	37	39	49	50	270.0					
39	37	38	24	40	30.0					
40	24	39	41	42	330.0					
41	40	42	52	53	270.0					
42	40	41	27	43	30.0					
43	27	42	44	45	330.0					
44	43	45	55	56	270.0					
45	43	44	30	46	30.0					
46	30	45	33	47	330.0					
47	33	46	56	57	240.0					
48	35	49	58	0	300.0					
49	35	48	38	50	30.0					
50	38	49	51	52	330.0					
51	50	52	58	59	270.0					
52	50	51	41	53	30.0					
53	41	52	54	55	330.0					
54	53	55	59	60	270.0					
55	53	54	44	56	30.0					
56	44	55	47	57	330.0					
57	47	56	60	0	240.0					
58	48	0	51	59	0.0					
59	51	58	54	60	0.0					
60	54	59	57	0	0.0					
19										
1	1	1	1.0	5	1 .1667	2 .2500	5 .2500	6 .1667	7 .1667	0
2	1	1	1.0	5	2 .2500	3 .2500	7 .1667	8 .1667	9 .1667	0
3	1	1	1.0	5	3 .2500	4 .1667	9 .1667	10 .1667	11 .2500	0
4	1	1	1.0	5	5 .2500	6 .1667	12 .2500	13 .1667	14 .1667	0
5	1	1	1.0	6	6 .1667	7 .1667	8 .1667	14 .1667	15 .1667	16 .1667
6	1	1	1.0	6	8 .1667	9 .1667	10 .1667	16 .1667	17 .1667	18 .1667
7	1	1	1.0	5	10 .1667	11 .2500	18 .1667	19 .1667	20 .2500	0
8	1	1	1.0	5	12 .2500	13 .1667	22 .1667	23 .2500	24 .1667	0
9	1	1	1.0	6	13 .1667	14 .1667	15 .1667	24 .1667	25 .1667	26 .1667
10	1	1	1.0	6	15 .1667	16 .1667	17 .1667	26 .1667	27 .1667	28 .1667
11	1	1	1.0	6	17 .1667	18 .1667	19 .1667	28 .1667	29 .1667	30 .1667
12	1	1	1.0	5	19 .1667	20 .2500	21 .1667	30 .1667	31 .2500	0
13	1	1	1.0	5	23 .2500	24 .1667	25 .1667	32 .2500	33 .1667	0
14	1	1	1.0	6	25 .1667	26 .1667	27 .1667	33 .1667	34 .1667	35 .1667
15	1	1	1.0	6	27 .1667	28 .1667	29 .1667	35 .1667	36 .1667	37 .1667
16	1	1	1.0	5	29 .1667	30 .1667	31 .2500	37 .1667	38 .2500	0
17	1	1	1.0	5	32 .2500	33 .1667	34 .1667	39 .1667	40 .2500	0
18	1	1	1.0	5	34 .1667	35 .1667	36 .1667	40 .2500	41 .2500	0
19	1	1	1.0	5	36 .1667	37 .1667	38 .2500	41 .2500	42 .1667	0
1		0								
0.00125			0.18							
1		0								
1		2								
2		3								
3		0								
4		1								
4		5								
5		2								
5		6								
6		3								
6		7								
3		7								
8		4								
8		9								
9		5								
9		10								
10		6								
10		11								
11		7								
11		12								
7		12								
12		0								

8	0	0
13	8	0
13	9	8
13	14	9
14	10	9
14	15	10
15	11	10
15	16	11
16	12	11
12	16	0
17	13	0
17	14	13
17	18	14
18	15	14
18	19	15
19	16	15
16	19	0
17	0	0
18	17	0
19	18	0
19	0	0
1	0	
1	0	
1	2	
2	0	
2	3	
3	0	
3	0	
4	0	
4	1	
4	5	
5	1	
5	2	
5	6	
6	2	
6	3	
6	7	
7	3	
7	0	
8	0	
8	4	
8	9	
9	4	
9	5	
9	10	
10	5	
10	6	
10	11	
11	6	
11	7	
11	12	
12	7	
12	0	
12	0	
8	0	
13	0	
13	8	
13	9	
13	14	
14	9	
14	10	
14	15	
15	10	
15	11	
15	16	
16	11	
16	12	
16	0	
17	0	

	17	13							
	17	14							
	17	18							
	18	14							
	18	15							
	18	19							
	19	15							
	19	16							
	19	0							
	17	0							
	18	0							
	19	0							
	0								
	1	0							
	1	2							
	1	0.0	0.00425						
1	1	2							
		.0							
	1	0							
	1	2							
	1	0.0	0.00425						
1	1	2							
		1.0							
	1	0							
	1	2							
	1	0.0	0.00425						
1	1	2							
		1.0							
	1	0							
	1	2							
	1	0.0	0.00425						
1	1	2							
		1.0							
	1	0							
	1	2							
	1	0.0	0.00425						
1	1	2							
		1.0							
	1	0							
	1	2							
	1	0.0	0.00425						
1	1	2							
		1.0							
	1	0							
	1	2							
	1	0.0	0.00425						
1	1	2							
		.0							
	1								
1	1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

