

温度成層化現象に対する解析的評価手法の確立（Ⅰ）

～単相多次元コードAQUAによる40%出力試験定常時
および過渡時解析結果～

1996年10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ください。

〒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

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

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

温度成層化現象に対する解析的評価手法の確立(I) ～単相多次元コード AQUA による 40%出力試験定常時 および過渡時解析結果～

土井 穎浩*、村松 寿晴*

要　旨

高速炉のスクラム過渡時に発生する温度成層化現象は、構造材に熱応力を与えるため、温度成層化挙動の特徴を評価することは機器の構造健全性および安全性の観点から重要である。本報告は、高速増殖原型炉「もんじゅ」における40%出力定常時、および40%出力定常時からのスクラム過渡時の上部プレナム内温度分布を単相多次元コードAQUAにより解析し、解析に用いる乱流モデルの同現象評価に対する適用性を検討した。

軸方向温度分布について測定結果と解析結果を比較した。定常時における下部フローホールより上方の温度分布について測定値と解析結果の一致は良好であった。下部フローホールより下側では、解析結果は測定結果よりも高い温度を示した。これは、実機において下部フローホールよりも下側に低温の冷却材が停滞しているためと考えられる。

一方、過渡時については、原子炉スクラムから約120秒後には、測定結果、解析結果とも上部フローホール近傍の高さで温度成層を生じる。測定結果と解析結果の成層界面位置はほぼ一致するものの、温度成層界面の温度勾配は解析結果の方がより早く緩やかになる傾向が見られた。これは上部プレナム下部の低温冷却材の流れが、過渡時の軸方向温度分布に影響を及ぼしているためと考えられる。このことから測定結果の温度成層化現象を精度良く予測するためには、定常時および原子炉スクラム初期に上部プレナム下部に停滞する低温の冷却材を適切にモデル化することが重要である。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 热流体技術開発室

Investigation of Analytical Methods in Thermal Stratification analysis (I)

- Analyses of normal and scram conditions of 40% power operation with AQUA code-

Yoshihiro Doi*, Toshiharu Muramatsu*

Abstract

Thermal stratification phenomena are observed in an upper plenum of liquid metal fast breeder reactors (LMFBRs) under reactor scram conditions, which give rise to thermal stress on structural components. Therefore it is important to evaluate characteristics of phenomena in the design of the internal structure in an LMFBR plenum. To evaluate the thermal stratification characteristics of the prototype fast breeder reactor, MONJU, numerical analyses were carried out with AQUA code using algebraic stress model (ASM) and $k-\epsilon$ model for normal and scram conditions with 40% power operation.

Through comparison of analysis results and measured temperature, analysis result was agreed well with measured around the inner vessel above lower flow hole level in steady condition. In the lower region of the upper plenum, the analysis result showed that the temperature is higher than the measured. The cold fluid would remain in the lower region and made the temperature difference.

In post-scram condition, thermal stratification phenomena was observed in measured and analytical temperature distributions after 120 seconds from the scram. Axial location of stratification interface in analysis was agreed with the measured. Though, temperature gradient of the stratification interface in analysis was gentle compared with the measured in same period from the scram. The cold fluid in the lower region would cause this difference of the temperature gradients and make important role of the thermal stratification phenomena in the upper plenum.

* Thermalhydraulic Research Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC

目 次

第1章 緒 言	.....	1
第2章 解析条件	.....	2
2.1 解析モデル	.....	2
2.2 初期条件および過渡条件	.....	3
2.3 乱流モデル	.....	4
2.4 数値計算条件	.....	4
第3章 解析結果	.....	5
3.1 定常時解析結果	.....	5
3.2 過渡時解析結果	.....	6
3.3 乱流モデルによる相違	.....	8
第4章 試験結果との比較	.....	11
4.1 定常時温度分布	.....	11
4.2 過渡時温度分布	.....	11
第5章 考 察	.....	13
5.1 乱流モデルによる相違	.....	13
5.2 測定結果との比較	.....	13
第6章 結 言	.....	15
謝 辞	.....	16
参考文献	.....	17

表リスト

表 2.1 定常時の炉心出口温度と炉心出口流量	18
表 2.2 乱流運動エネルギー散逸率および温度ゆらぎ強度の式で用いる定数	19
表 2.3 レイノルズ応力の式で用いる定数	19
表 2.4 乱流熱流束評価式で用いる定数	19

図リスト

図 2.1 メッシュ分割図	20
図 2.2 炉心領域分割図	21
図 2.3 過渡時の炉心出口冷却材温度の時間変化	22
図 2.4 過渡時の炉心出口冷却材流量の時間変化	24
図 3.1 ASM による定常時解析結果($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)	26
図 3.2 ASM による定常時解析結果($r-\theta$ 面内流速分布および温度分布)	30
図 3.3 ASM による定常時解析結果(各周方向断面の軸方向温度分布)	31
図 3.4 $k-\varepsilon$ モデルによる定常時解析結果($r-Z$ 面内流速分布および温度分布) ...	32
図 3.5 $k-\varepsilon$ モデルによる定常時解析結果($r-\theta$ 面内流速分布および温度分布) ...	36
図 3.6 $k-\varepsilon$ モデルによる定常時解析結果(各周方向断面の軸方向温度分布) ...	37
図 3.7 ASM による過渡時解析結果($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)	38
図 3.8 $k-\varepsilon$ モデルによる過渡時解析結果($r-Z$ 面内流速分布および温度分布) ...	41
図 3.9 定常時の半径方向流速分布と軸方向流速分布	44
図 3.10 定常時の半径方向温度分布と軸方向温度分布	45
図 3.11 原子炉スクラムから 180 秒後の半径方向流速分布と軸方向流速分布	46
図 3.12 原子炉スクラムから 300 秒後の半径方向流速分布と軸方向流速分布	47
図 3.13 原子炉スクラムから 180 秒後の半径方向温度分布と軸方向温度分布	48
図 3.14 原子炉スクラムから 300 秒後の半径方向温度分布と軸方向温度分布	49
図 4.1 定常時の測定結果と解析結果の軸方向温度分布	50
図 4.2 過渡時の測定結果と解析結果の軸方向温度分布(I=27, J=10)	51
図 5.1 定常時の軸方向乱流熱流束分布と流況図	52
図 5.2 原子炉スクラムから 180 秒後の軸方向乱流熱流束分布と流況図	53
図 5.3 原子炉スクラムから 300 秒後の軸方向乱流熱流束分布と流況図	54
図 5.4 軸方向各位置の温度の時間変化	55

第1章 緒 言

原子炉容器上部プレナム内の温度成層化現象は、高速炉のスクラム過渡時に高温の冷却材に満たされた上部プレナム内に炉心からの低温ナトリウムが流れ込むことにより発生する。炉心からの低温ナトリウムは、その慣性力が負の浮力効果よりも小さい場合、上部プレナム内の下層に低温ナトリウムの領域を、上層に高温ナトリウムの領域を生じ、その境界に温度成層界面を形成する。この温度成層界面では軸方向に温度勾配が大きく、時間とともに界面の位置が変化するため構造材料に熱応力を与える。このため、温度成層界面の挙動や特徴を把握することは機器の構造健全性および安全性評価の観点から重要である。

温度成層界面の挙動を評価するため、これまでに作動流体にナトリウムや水を用いた試験が実施され、多次元熱流動解析による評価が行われた⁽¹⁾⁽²⁾。特に、熱伝導の影響が支配的とならない程度の大型ナトリウム試験として、PLANDTL-DHX による温度成層化試験⁽³⁾が実施され、多次元熱流動解析コード AQUA による検証⁽⁴⁾が行われてきている。

本報告は、高速増殖原型炉「もんじゅ」における 40%出力定常時、および 40%出力定常時からのスクラム過渡時の上部プレナム内温度分布を単相多次元コード AQUA により解析し、解析に用いる乱流モデルの適用性を評価するものである。解析には ASM (*Algebraic Stress Turbulence Model*) と $k - \varepsilon$ モデルを使用し、解析結果を原子炉容器温度プレナム評価試験結果⁽⁵⁾と比較評価する。

第2章 解析条件

2.1 解析モデル

2.1.1 メッシュ分割

図2.1に本解析に使用したメッシュ分割図を示す。解析領域は、参考文献(6)と同様に原子炉上部プレナムの周方向1/3セクターである。解析メッシュには、内筒フローホール、整流筒、炉心上部機構(UCS)、炉心槽および出口配管をモデル化する。

2.1.2 境界条件

(1)流入境界条件

本解析モデルにおける入口境界は集合体ハンドリングヘッド上端面であり、流入境界条件として炉心から上部プレナムへの冷却材流速と冷却材温度を与える。

(2)流出境界条件

炉心から上部プレナムへ流入した冷却材は、全て出口配管から流出する。

(3)温度指定境界

内筒取付台を温度指定境界とし、炉心から流出する冷却材温度を与える。原子炉容器側面は断熱条件とする。

2.1.3 圧力損失特性

本解析で使用した圧力損失特性は参考文献(6)と同じである。その概略を以下に示す。

(1)内筒フローホール

上部および下部フローホールの入口面(炉心側)と出口面(炉容器側)での縮流、拡大に対して以下の圧力損失 ΔP を与える。

$$\Delta P = -\xi \rho \frac{V_r^2}{2} \quad (2.1)$$

ここに ξ は圧力損失係数であり1.6⁽⁷⁾とする。 ρ は密度、 V_r は入口面から出口面へ向かう流速である。

(2)炉容器-内筒間アニュラス部

内筒の上端部では縮流と考え、(2.1)式により圧力損失を与える。 ξ は0.5⁽⁶⁾とする。アニュラス部には軸方向の摩擦損失として、以下の圧力損失 ΔP を与える。

$$\Delta P = -f_z \rho \frac{V_z^2}{2} \frac{\Delta z}{D} \quad (2.2)$$

摩擦損失係数 f_z は Re により

$$f_z = \frac{Re}{64} \quad (Re \leq 2000)$$

$$f_z = 0.3164 Re^{-\frac{1}{4}} \quad (Re \geq 2000) \quad (2.3)$$

とする。ここに V_z は軸方向流速、 Δz は軸方向メッシュ長さ、 D はアニュラス幅である。

(3) 制御棒上部案内管近傍

制御棒上部案内管まわりの軸方向には(2.2)式の摩擦損失を定義する。 D は水力等価直径として $0.165^{(6)}$ とする。径方向には上部案内管を水平に横切る時の円柱による圧力損失を考慮し(2.1)式を与える。 ξ は $0.52^{(6)}$ とする。

(4) 整流筒近傍

整流筒による縮流・拡大の圧力損失を(2.1)式によりそれぞれ与える。縮流および拡大に対する ξ はそれぞれ $0.37^{(6)}$ 、 $0.46^{(6)}$ とする。

2.1.4 伝熱特性

炉心上部機構と内筒について以下の式により熱伝達を考慮する⁽⁶⁾。 Nu 数は、

$$Nu = 3.64 \quad (Pe \leq 47.5)$$

$$Nu = 5.0 + 0.038 Pe^{0.68} \quad (Pe \geq 47.5) \quad (2.4)$$

とする。

構造材の材質は SUS304 であり、その物性値は、

- ・熱伝導率 : $\lambda = 12.66 + 0.01924T - 5.882 \times 10^{-6}T^2$ [W/m°C]
- ・比熱 : $C_p = 490.5 + 8.834 \times 10^{-2}T + 1666 \times 10^{-4}T^2$ [J/kg°C] (2.5)
- ・密度 : $\rho = 8035.5 - 0.4049T - 5.02 \times 10^{-5}T^2$ [kg/m³]

とする⁽⁶⁾。ここに T は温度であり、単位は [°C] である。

2.2 初期条件および過渡条件

炉心部から上部ブレナムへ流入する冷却材の温度は、40%出力試験定常時および過渡時の測定結果⁽⁵⁾を用いる。各炉心領域の流量は、汎用流量配分計算コード GENERAL⁽⁸⁾による解析結果を用い、過渡時の流量変化は試験により測定された変化の比率を用いる。解析モデルでは炉心領域を図 2.2 のように分割し、各炉心領域に冷却材流量および温度を与える。定常時の炉心出口冷却材温度および流量を表 2.1 に示す。過渡時の炉心出口冷却材温度および流量の時間変化を図 2.3、2.4 にそれぞれ示す。

2.3 乱流モデル

定常時解析ならびに過渡時解析に用いる乱流モデルは、代数応力乱流モデル (*ASM*)⁽⁴⁾⁽⁹⁾と $k-\varepsilon$ モデル⁽⁴⁾である。*ASM* の温度成層化現象に対する適用性は、参考文献(4)において 1/10 スケールのナトリウム試験結果⁽¹⁾との比較検討により示されている。本検討では、温度成層化現象に対して構造物の熱伝導効果が無視できる大型の装置で生じる温度成層化現象に対する *ASM* の適用性を $k-\varepsilon$ モデルとの比較により評価することを目的として、*ASM* と $k-\varepsilon$ モデルを用いた 2 つの解析ケースを設定する。

ASM における乱流運動エネルギー、乱流運動エネルギー散逸率および温度ゆらぎ強度の各式で用いる定数⁽⁹⁾を表 2.2 に示す。また、レイノルズ応力と乱流熱流束評価式で用いる各モデル定数を表 2.3、2.4 にそれぞれ示す。

2.4 数値計算条件

本解析に使用する数値計算条件を以下に示す。

- ・座標系 : $r-\theta-z$ 、3 次元円筒座標系
- ・メッシュ分割数 : $32^i \times 12^j \times 66^k$
- ・総メッシュ数 : 25344
- ・固体壁条件 : 非スリップ条件
- ・時間積分法 : 修正 ICE 法⁽¹⁰⁾
- ・対流項差分法 : 運動量式 … QUICK 法⁽¹⁰⁾
エネルギー式 … QUICK-FRAM 法⁽¹⁰⁾
乱流量式 … 1 次風上差分法⁽¹⁰⁾
- ・乱流モデル : *ASM*⁽⁴⁾⁽⁹⁾、 $k-\varepsilon$ モデル⁽⁴⁾

第3章 解析結果

3.1 定常時解析結果

3.1.1 ASMによる解析結果

図3.1に乱流モデルにASMを用いた定常時解析結果の $r-Z$ 面($j=1$ から 12)の流速分布と温度分布を示す。図3.2に $r-\theta$ 面($k=11, 16, 30$ および 60)の流速分布と温度分布を示す。また、図3.3に内筒内面から約300mm内側のI=27における軸方向温度分布を $j=1$ から 12 の各周方向断面について示す。

(1) 流速分布

$r-Z$ 面内の全体的な流況は、炉心燃料集合体の頂部から流出した冷却材が整流筒に入り、炉心上部機構の下面に衝突した後に半径方向に向きを変え、斜行流を形成している。この斜行する流れは内筒に達し、内筒内壁を上昇する流れと下降する流れに分流する。内筒内壁を上昇した流れは、ナトリウム液面近傍で炉心上部機構に向かう流れと内筒上端を超えて原子炉容器と内筒間のアニュラス部に流入する流れとなる。炉心上部機構に向かった流れは炉心上部機構の側壁に沿って下降し、上部プレナム内に一巡の大きな渦を形成する。内筒上端を超えてアニュラス部に流入した流れは、アニュラスを下降し、出口配管から流出する。一方、内筒内壁を下降した流れは、その一部が内筒に設けられたフローホールより流出し、残りは上部プレナム下部に局所的な循環渦を形成する。

プランケット燃料および反射体から流出した冷却材は、炉心頂部を水平方向に流れる。流れの一部は内筒に設けられたフローホールより流出し、炉心槽側部と炉心槽上部に局所的な渦を形成する。プランケット燃料および反射体から流出する冷却材の流れが水平方向に向かうのは、その流量が炉心燃料からの流量に比べて小さく、温度が低いためである。

$r-Z$ 面内には炉心上部機構により生じる斜行流の上方と下方に二つの大きな循環渦が形成され、この流況は周方向のいずれの断面についてもほぼ同様である。また、 $r-\theta$ 面内の流速分布は $k=11$ の炉心頂部付近では、炉心部から内筒内壁まで半径方向に向かう流れであり、局所的な渦は見られない。 $k=16, 20$ および 30 の断面では半径方向、周方向流速ともに小さいものである。

(2) 温度分布

$r-Z$ 面内の全体的な温度分布は上部フローホールの上方でほぼ一定であり、約490°Cから約500°Cである。上部フローホールより下側では約450°Cから約460°C、炉心

槽側部では約420°Cから約430°Cであり、定常的な温度成層を生じている。この温度成層はプランケット燃料および反射体から流出する低温の冷却材が、密度差によって上部プレナム下部に停滞するために生じるものと考えられる。この温度分布の傾向は周方向のいずれの断面についても同様であるが、上部プレナム下部の炉心頂部と下部フローホール間では局所的な循環渦のために温度成層の軸方向高さが異なる。

3.1.2 $k-\varepsilon$ モデルによる解析結果

図3.4に乱流モデルに $k-\varepsilon$ モデルを用いた定常時解析結果の $r-Z$ 面($j=1$ から12)の流速分布と温度分布を示す。また、図3.5に $r-\theta$ 面($k=11, 16, 30$ および60)の流速分布と温度分布を示す。また、図3.6にI=27の軸方向温度分布を $j=1$ から12の各周方向断面について示す。

(1) 流速分布

$r-Z$ 面内の全体的な流況は、ASMを用いた解析結果と同様であり、 $r-Z$ 面内には炉心から内筒に向かう斜行流とその上方に大きな循環渦が形成される。炉心槽側部では、 $k-\varepsilon$ モデルでASMの結果よりも大きな循環渦が見られる。この流況は周方向のいずれの断面についてもほぼ同様である。また、 $r-\theta$ 面内の流速分布についても局所的な渦は軸方向のいずれの断面においても見られず、ASMを用いた解析結果と同様である。

(2) 温度分布

$r-Z$ 面内の全体的な温度分布は、ASMを用いた解析結果と同様であり、上部フローホールの上方ではほぼ一定で、約490°Cから約500°Cである。上部フローホールより下側では約450°Cから約460°C、炉心槽側部では約420°Cから約430°Cである。炉心槽側部の温度分布は $k-\varepsilon$ モデルとASMで差異が見られるが、定常的な温度成層を生じている点においてASMと同様である。軸方向温度分布の傾向は周方向のいずれの断面についてもほぼ同様であるが、上部プレナム下部の炉心頂部と下部フローホール間では局所的な循環渦のために温度成層の軸方向高さが異なる。また、 $r-\theta$ 面内の温度分布についてはASMを用いた解析結果と同様である。

3.2 過渡時解析結果

3.2.1 ASMによる解析結果

図3.7に乱流モデルにASMを用いた過渡時解析結果の手動トリップから300秒間(0、5、10、20、30、40、50、60、80、100、120、140、160、180、200、220、240、260、280および300秒)の $r-Z$ 面($J=10$)の流速分布と温度分布の時間変化を示す。

(1) 流速分布

過渡時の $r-Z$ 面内の全体的な流況は、原子炉スクラムにより燃料集合体からの冷却材温度と冷却材流量が減少するため、定常時に見られた炉心頂部から内筒に向かう斜行流が時間の経過と共に見られなくなる。原子炉スクラムから約 30 秒後には炉心からの流れは水平方向に向かい、定常時に斜行流の上方で見られた循環渦は消失する。その後、さらに燃料集合体からの冷却材温度と冷却材流量が低下し、原子炉スクラムから約 30 秒後以降には炉心からの流れは内筒取付台と炉心頂部間の領域に向かうようになる。

原子炉スクラムから約 100 秒後の全体的な流況は、炉心からの流れが内筒内面に到達し、上昇流となり温度成層界面より下側で半径方向に蛇行する流れが形成される。一方、温度成層界面よりも上方での冷却材の流速は非常に遅くなる。

原子炉スクラムから約 300 秒後には、炉心からの低温冷却材は内筒取付台の付近まで降下し、内筒内面に沿って上昇する流れとなる。この流れは炉心上部機構に向かう水平な流れとなり、炉心上部機構の近傍で再び上昇流となっている。

(2) 温度分布

過渡時の $r-Z$ 面内の全体的な温度分布は、原子炉スクラム後約 30 秒から低温の冷却材が内筒取付台と炉心頂部間の領域に停滯するようになり、内筒取付台と炉心頂部間の温度が低下する。その後も低温の冷却材が上部プレナム内に流入するため、上部プレナム下部の低温冷却材が占める領域は軸方向に広がって行く。原子炉スクラムから約 120 秒後には炉心上部機構下面より下側の領域が低温冷却材で満たされ明確な温度成層が形成される。原子炉スクラムから約 120 秒以降において上部プレナム下部の温度はさらに低下するとともに、低温冷却材の領域が軸方向に拡大し、温度成層界面は上方に移動する。原子炉スクラムから約 300 秒後には、上部フローホール付近よりも下側は低温の冷却材で満たされ温度成層界面の下側位置は上部フローホール付近に達する。

3.2.2 $k-\varepsilon$ モデルによる解析結果

図 3.8 に乱流モデルに $k-\varepsilon$ モデルを用いた過渡時解析結果の手動トリップから 300 秒間 (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280 および 300 秒) の $r-Z$ 面 ($J=10$) の流速分布と温度分布の時間変化を示す。

(1) 流速分布

過渡時の $r-Z$ 面内の全体的な流況は、定常時に見られた炉心頂部から内筒に向かう斜行流が時間の経過と共に見られなくなり、その後の流況も *ASM* を用いた解析結果の場合と類似している。

原子炉スクラムから約 120 秒後の全体的な流況は、炉心からの流れが内筒内面に到達

し、上昇流となり、温度成層界面より下側では半径方向に蛇行する流れが形成される。この上昇流により生じる流れは $k-\varepsilon$ モデルの方が ASM の場合よりも大きくなっている。このため、原子炉スクラムから約 180 秒後には、上部フローホールより下側の流況は、 ASM では下降流は見られず半径方向に水平な流れになっているのに対し、 $k-\varepsilon$ モデルでは下降流が見られる。

(2) 温度分布

過渡時の $r-Z$ 面内の全体的な温度分布は、 ASM を用いた解析結果と同様であり、原子炉スクラム後約 30 秒から低温の冷却材が内筒取付台と炉心頂部間の領域に滞留するようになり、内筒取付台と炉心頂部間の温度が低下する。原子炉スクラムから約 120 秒後には炉心頂部機構下面より下側の領域が低温冷却材で満たされ明確な温度成層が形成される点においても ASM を用いた解析結果と類似している。原子炉スクラム後約 180 秒に見られた ASM と $k-\varepsilon$ モデルの上部フローホール下側の流況の違いは温度分布に優位な影響を与えず、両モデルで軸方向温度分布はほぼ同じである。

3.3 乱流モデルによる相違

3.3.1 定常時解析結果

(1) 流速分布

図 3.9 に $I=27$ 、ナトリウム出口配管を含む断面から周方向に約 40 度離れた $J=10$ の断面での半径方向流速 (u) の分布と炉心頂部機構下面の $K=20$ と炉心からの斜行流が内筒に達する高さ $K=30$ における軸方向流速 (w) の分布を ASM と $k-\varepsilon$ モデルについて示す。

ASM と $k-\varepsilon$ モデルについて半径方向の流速を比較すると、 $k-\varepsilon$ モデルでは炉心頂部付近の水平な流れは最大で約 0.2m/s であるが、 ASM では約 0.02m/s と小さくなっている。また、炉心出口から内筒へ向かう斜行流の半径方向流速は $k-\varepsilon$ モデルでは約 0.1m/s、 ASM では約 0.2m/s であり、 ASM の方が大きい。

軸方向の流速について比較した場合には、 $K=20$ の断面においては、炉心上部機構の近傍では ASM で約 0.8m/s、 $k-\varepsilon$ モデルで約 0.6m/s であり ASM の方が大きい。 $K=30$ の断面では、内筒内面付近で ASM の方が $k-\varepsilon$ モデルよりも流速が速く、それぞれ約 0.4m/s、0.3m/s である。従って、炉心部から内筒に向かう斜行流の流速は $k-\varepsilon$ モデルよりも ASM の方が大きく、斜行流が内筒内面に到達し上昇流となった後の流速も ASM の方が大きくなっている。

(2) 温度分布

図 3.10 に $I=27$ 、 $J=10$ の断面における軸方向温度分布と $K=20$ 、 30 における半径方向温度分布を ASM と $k-\varepsilon$ モデルについて示す。

ASM と $k-\varepsilon$ モデルについて軸方向の温度分布を比較すると、炉心頂部と内筒取付台の間で温度分布の相違が見られる。また、炉心頂部より上方での両モデル間の温度差は約 5°C である。

半径方向の温度分布について比較すると、 $K=20$ の断面において内筒内面付近では ASM の方が $k-\varepsilon$ モデルよりも約 5°C 温度が低く、 $K=30$ の断面では両モデル間での温度差はほとんど見られない。

3.3.2 過渡時解析結果

(1) 流速分布

図 3.11 と図 3.12 に原子炉スクラムから 180 秒後と 300 秒後の $I=27$ 、 $J=10$ の断面での半径方向流速 (u) の分布と $J=10$ 、 $K=20$ と $K=30$ における軸方向流速 (w) の分布をそれぞれ ASM と $k-\varepsilon$ モデルで比較して示す。

原子炉スクラムから 180 秒後において、炉心頂部より下側の半径方向流速は ASM では約 0.08m/s、 $k-\varepsilon$ モデルでは約 0.06m/s であり、 ASM の方が速くなっている。また、上部フローホール付近の炉心上部機構に向かう流速は、 ASM では約 0.04m/s、 $k-\varepsilon$ モデルでは約 0.03m/s である。軸方向流速は $K=20$ の断面において炉心上部機構の近傍で差を生じており、 $k-\varepsilon$ モデルの方が早くなっている。 $K=30$ の断面では、ほぼ同様の流速であり、 ASM と $k-\varepsilon$ モデルでの差はほとんどない。

原子炉スクラムから 300 秒後において、 ASM と $k-\varepsilon$ モデルの半径方向流速を比較すると、上部フローホール付近では ASM で約 0.04m/s、 $k-\varepsilon$ モデルで約 0.01m/s であり、この軸方向位置以外には半径方向流速に大きな差は見られない。軸方向流速について比較した場合には、 $K=20$ の断面において、炉心上部機構の近傍で ASM では約 0.06m/s、 $k-\varepsilon$ モデルで約 0.12m/s と $k-\varepsilon$ モデルの方が大きくなっているが、 $K=30$ の断面では、 ASM と $k-\varepsilon$ モデルで軸方向流速の差は小さい。

(2) 温度分布

図 3.13 と図 3.14 に原子炉スクラムから 180 秒後と 300 秒後の $I=27$ 、 $J=10$ の断面における軸方向温度分布と $K=20$ 、 30 における半径方向温度分布をそれぞれ ASM と $k-\varepsilon$ モデルについて示す。

ASM と $k-\varepsilon$ モデルについて、軸方向の温度分布には原子炉スクラム 180 秒後、300 秒後とも温度分布にはほとんど差は無い。原子炉スクラムから約 180 秒後には炉心上部機構の近傍で、 $k-\varepsilon$ モデルの方が ASM の場合よりも約 20°C 温度が高いが、 $K=30$ の断面については両モデル間の差はほとんど見られない。炉心上部機構の近傍の温度差は、原

子炉スクラムから約300秒後においても見られ $k-\varepsilon$ モデルの方が ASM よりも約20℃高くなっている。この $K=20$ の断面における ASM と $k-\varepsilon$ モデルの半径方向温度分布の差は温度成層界面下側の軸方向流速分布の差によるものと考えられる。

第4章 試験結果との比較

本章では、定常時と過渡時について、ASM を用いた解析結果と原子炉容器温度プレナム評価試験結果⁽⁵⁾を比較評価する。原子炉容器温度プレナム評価試験では、周方向角度 305 度¹、内筒内面からの距離 210mm の位置において軸方向温度分布が測定されている。測定位は本解析メッシュにおける半径方向 I=27、周方向 J=10 の位置に相当する。以下では解析結果の I=27、J=10 での軸方向温度分布を試験結果と比較検討する。

4.1 定常時温度分布

図 4.1 に定常時の軸方向温度分布測定結果と解析結果の比較を示す。測定値と解析結果の温度分布を比較すると、上部フローホールより上方の軸方向温度分布は、測定値の方が約 5°C 高い。しかしながら、上部フローホールと下部フローホール間の温度分布は測定値と解析結果は良く一致しており、上部プレナム内において高温の冷却材が占める領域を解析は良く模擬している。測定値と解析結果の温度分布で最も相違が見られるのは、下部フローホールより下側の温度分布である。炉心頂部高さ付近の温度は、測定値で約 410°C であるのに対し、解析結果では約 450°C である。解析結果では、プランケット燃料および反射体からの低温冷却材は内筒内面付近に到達するまで下部フローホールより上方の高温冷却材と混合され、温度が高くなっている。測定結果において下部フローホールより下側の温度が低いのは、実機では下部フローホールよりも下側に低温の冷却材が停滞しているためと考えられる。

4.2 過渡時温度分布

図 4.2 に原子炉スクラムから 300 秒間の軸方向温度分布測定結果と解析結果の比較を示す。原子炉スクラムから約 60 秒後には、温度成層が形成されはじめると、解析結果では下部フローホールより下側の温度が測定値よりも高く、温度成層の勾配は緩やかである。原子炉スクラムから約 120 秒後には、測定結果、解析結果とも上部フローホール近傍の高さで温度成層が生じている。しかしながら、上部フローホール付近の温度は解析結果の方が約 30°C 高いために、成層界面の温度勾配は解析結果と測定結果で一致していない。原子炉スクラムから約 180 秒後には、炉心頂部付近の温度が解析結果と測定値で一致するようになるが、解析結果では上部フローホールより上側の温度勾配が緩やかになります。解析結果において原子炉スクラムから約 180 秒以降では形成された温度勾配が時間とともに上昇するが、その温度勾配は測定結果に比べ緩やかなまま推移する。

従って、解析結果と測定結果で軸方向温度分布の時間変化が一致しないのは、解析結果では定常時に炉心頂部よりも下側に滞留するナトリウムの温度が実際よりも高いために

¹ ナトリウム透視装置設置方位

原子炉スクランにより形成される温度勾配が緩やかなまま推移し、炉心頂部よりも下側が低温の冷却材で満たされる前に成層界面の温度勾配が緩やかになるためと考えられる。

第5章 考 察

5.1 乱流モデルによる相違

定常時および原子炉スクラムから 300 秒後までの過渡時解析結果において乱流モデルに *ASM* を用いた場合と *k-ε* モデルを用いた場合で、内筒内面近傍の軸方向温度分布に顕著な差異は見られなかった。「原子炉容器内冷却材の温度成層化の評価（第4報）—応力代数式乱流モデルの検討—」⁽⁹⁾では、原子炉上部プレナム縮尺ナトリウム実験解析において温度成層界面より上方の乱流熱流束の相違が温度成層界面の上昇速度に影響を与えることが示されている。図 5.1、5.2 および 5.3 は定常時、原子炉スクラムから 180 秒後および 300 秒後の軸方向の乱流熱流束分布を *ASM* と *k-ε* モデルでそれぞれ比較したものである。軸方向の位置は、半径方向が I=27、周方向が J=10 であり、以下の式により求められる乱流熱流束を熱伝導率に物性値を用いた場合の熱流束と比較した。

ASM における乱流熱流束は、

$$\ddot{q}_t^{ASM} = -\rho C_p \overline{w' \theta'} \quad (5.1)$$

であり、ここに w' は軸方向流速の乱れ成分、 θ' は温度の乱れ成分を表す。

k-ε モデルにおける乱流熱流束は、

$$\ddot{q}_t^{k-\epsilon} = -\rho C_p \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5.2)$$

とし、 ν_t は乱流動粘性係数、 Pr_t は乱流プラントル数(0.9)、 T は温度、 z は高さである。 ν_t は $C\mu \cdot k^2 / \epsilon$ から求め、 $C\mu$ はモデル定数(0.09)、 k は乱流運動エネルギー、 ϵ は乱流運動エネルギー散逸率である。

熱伝導率に物性値を用いた場合の熱流束は、熱伝導率を λ として、

$$\ddot{q}_t = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5.3)$$

である。

図 5.1 と図 5.2 の定常時および原子炉スクラムから 180 秒後の軸方向乱流熱流束分布は、*ASM* と *k-ε* モデルでほぼ同じである。図 5.3 の原子炉スクラムから 300 秒後の軸方向乱流熱流束分布は、ナトリウム液面からの高さが-4000mm よりも上方において *ASM* の方が大きくなっているが、上部プレナム内の温度分布に顕著な差異は見られなかった。図 5.3 に示した温度成層付近における流況から、炉心頂部機構の側面で見られる上昇流が温度成層に流入し、温度成層付近で対流現象を生じていることがわかる。この対流により本解析における温度成層の挙動が支配され、*ASM* と *k-ε* モデルで軸方向温度分布の変化に大きな差異を生じず、成層界面の上昇特性に差異を生じなかつたと考えられる。

5.2 測定結果との比較

軸方向温度分布について解析結果と測定結果を比較した時の相違は、定常時において炉

心頂部よりも下側に滞留するナトリウムの温度である。解析では、定常時において炉心頂部の温度が高いため、原子炉スクラムにより流入する低温冷却材により形成される温度勾配は測定結果よりも緩やかなまま推移し、上部フローホールよりも下側が低温冷却材で満たされる前に、温度成層の温度勾配が緩やかになる傾向を示した。

図 5.4 は内筒近傍の各軸方向位置における温度の時間変化について *ASM* を用いた解析結果と測定結果で比較したものである。炉心頂部より Na 液面からの高さが-4000mm の間では、測定された温度の時間変化には大きな変動は見られないが、解析結果では定常時より原子炉スクラムから約 150 秒までの間に約 10℃の温度変動が見られる。解析結果におけるこの温度変動は炉心からの流れが内筒内面に到達し、上昇流となる際に生じるものと考えられる。測定結果において解析結果で見られるような温度変動が生じないのは、実機では上部フローホールよりも下側の流れが解析結果に比べて穏やかであり、軸方向に大きな流れを生じていないためと考えられる。解析結果で見られる原子炉スクラム初期に温度成層よりも下側で生じる対流は、その後の上部プレナム内の流況に影響を与え、測定結果と解析結果で温度成層界面の挙動に差異を生じさせたものと推定される。

すなわち、解析結果では、

- ①定常時における上部プレナム下部の温度が測定結果よりも高い。
- ②このため、過渡時に温度成層より下側の温度が測定結果よりも高くなる。
- ③浮力の効果により温度成層界面への外乱の程度が大きくなる。
- ④結果として温度成層界面の上昇量を過大に評価することになったものと考えられる。

以上から測定結果の温度成層化現象を精度良く予測するためには、定常時および原子炉スクラム初期に上部プレナム下部に停滞する低温の冷却材を適切にモデル化することが重要である。

第6章 結 言

高速増殖原型炉「もんじゅ」における40%出力定常時、および40%出力定常時からのスクラム過渡時の上部プレナム内温度分布を定常時から原子炉スクラム300秒後までについて単相多次元コードAQUAにより解析した。解析にASMと $k-\varepsilon$ モデルを使用し、両解析モデルによる結果の相違を検討し、ASMによる解析結果と測定結果を比較評価した結果、以下のことが明らかになった。

[乱流モデルによる相違]

- (1)乱流モデルにASMを用いた場合と $k-\varepsilon$ モデルを用いた場合で定常時、過渡時ともに内筒内面近傍の軸方向温度分布に顕著な相違は見られなかった。
- (2)軸方向の乱流熱流束は原子炉スクラムから300秒後でASMは $k-\varepsilon$ モデルよりも大きく評価したが、同時刻の軸方向温度分布に差異はなかった。これは炉心頂部機構の側面での上昇流が温度成層に流入することにより温度成層付近で生じる対流現象が、軸方向温度分布に大きく影響しているためと考えられる。

[測定結果との比較]

- (1)内筒近傍の軸方向温度分布をASMを用いた解析結果と測定結果で比較した。その結果、定常時における軸方向温度分布は解析結果と測定結果で良好に一致したが、過渡時の軸方向温度勾配は、解析結果の方が測定結果よりも早く緩やかになる傾向を示した。
- (2)温度の過渡変化を解析結果と測定結果で比較した場合、軸方向高さが炉心頂部よりNa液面からの高さが-4000mmの領域において、測定結果では大きな温度の時間変動は見られないが、解析結果では定常時から原子炉スクラム150秒後までの間に約10℃の温度変動が見られた。この温度変動は炉心からの流れが内筒内面に到達し、上昇流となる際に生じるものと考えられる。測定結果において温度変動が見られないのは、上部プレナム下部の流れが停滞しており、軸方向に大きな流れを生じないためと考えられる。
- (3)解析結果の原子炉スクラム初期に温度成層よりも下側で生じる対流は、その後の上部プレナム内の流況に影響を与え、測定結果と解析結果で温度成層界面の挙動に差異を生じたものと推定される。
- (4)測定結果の温度成層化現象を精度良く予測するためには、定常時および原子炉スクラム初期に上部プレナム下部に停滞する低温の冷却材を適切にモデル化することが重要である。

謝　　辞

本報告書の測定結果のデータ処理にあたり御助言頂いた動力炉開発本部 大滝 明副主研、
もんじゅ建設所 プラント2課 梶木 孝介研究員に感謝致します。また、解析作業の実施に
あたり、AQUA コードによる計算の実行および計算結果の図形処理に協力して頂いた（株）
CSK 川上 一夫 氏に感謝致します。

参考文献

- (1) Y.Ieda、I.MaeKawa、T.Muramatu、S.Nakanishi、Experimental and analytical studies of the thermal stratification phenomenon in the outlet plenum of fast breeder reactors、Nuclear Engineering and Design 120 (1990) 403-414
- (2) N.Tanaka、S.Moriya、S.Ushijima、T.Koga、Prediction method for thermal stratification in a reactor vessel、Nuclear Engineering and Design 120 (1990) 395-402
- (3) 桃井 一光、林 謙二、磯崎 正、上出 英樹、家田 芳明、PLANDTL-DHX 装置による上部プレナム温度成層化ナトリウム試験、PNC ZN9410 94-292、1994年10月
- (4) Toshiharu Muramatsu、Hisashi Ninokata、Investigation of turbulence modelling in thermal stratification analysis、Nuclear Engineering and design 150 (1994) 81-93
- (5) 土井 穎浩、村松 寿晴、榎木 孝介、原子炉容器上部プレナム温度評価試験(I)-40% 出力試験定常時および過渡時温度測定結果-、PNC ZN9410 96-117、1996年5月
- (6) 村松 寿晴、村田 正幸、単相多次元コード AQUA による高速原型炉「もんじゅ」炉内熱流動解析(IV)-性能試験期間中における定格負荷運転状態からの自然循環移行解析-、PNC ZN9410 92-106、1992年4月
- (7) (株)東芝、(株)日立製作所、三菱重工業(株)、高速炉エンジニアリング(株)、原型炉総合機能試験予測解析のための入力データの整備(II)[別冊:データ集(2/3)]、PNC ZJ2449 90-001、1990年3月
- (8) 宮越 弘幸、家田 芳明、佐藤 和二郎、森薗 孝次、澤田 周作、中島 文明、「もんじゅ」炉内流量分布評価(II)-炉心燃料全数装荷時の炉内流量分布特性-、PNC ZN9410 95-047、1995年2月
- (9) 村松 寿晴、二ノ方 寿、原子炉容器内冷却材の温度成層化の評価(第4報) -応力代数式乱流モデルの検討-、PNC N9410 89-132、1989年9月
- (10) 前川 勇、村松 寿晴、単相多次元熱流動解析コード-AQUA- 数値計算説明書、PNC N9520 87-012、1987年5月

表 2.1 定常時の炉心出口温度と炉心出口流量

名称	流量領域	炉心列	流量 [kg/s]	温度 [°C]	表面番号
制御棒	—	—	1.41	359.7	12
内側炉心	第 1	1	23.61	513.0	13
内側炉心	第 1	2	47.21	511.0	14
内側炉心	第 2	3	16.75	509.0	15
制御棒	—	—	4.22	359.7	16
内側炉心	第 2	3	22.34	509.0	17
制御棒	—	—	1.53	359.7	18
内側炉心	第 2	3	5.58	509.0	19
内側炉心	第 3	4	85.2	511.0	20
内側炉心	第 4	5	4.97	499.0	21
制御棒	—	—	4.22	359.7	22
内側炉心	第 4	5	39.78	499.0	23
制御棒	—	—	1.53	359.7	24
内側炉心	第 4	5	34.81	499.0	25
内側炉心	第 4	5	32.55	482.0	26
制御棒	—	—	4.22	359.7	27
内側炉心	第 5	6	46.5	482.0	28
制御棒	—	—	4.22	359.7	29
内側炉心	第 5	6	13.95	482.0	30
外側炉心	第 6	7	150.43	492.0	31
外側炉心	第 8	8	11.92	470.0	32
外側炉心	第 7	8	29.98	470.0	33
外側炉心	第 8	8	39.3	507.0	34
外側炉心	第 7	8	29.66	507.0	35
外側炉心	第 8	8	27.8	470.0	36
ブランケット	第 9	9	47.31	427.0	37
ブランケット	第 10	10	25.16	419.6	38
ブランケット	第 11	11	11.63	420.9	39
反射体	—	—	9.54	359.7	40

表 2.2 乱流運動エネルギー散逸率および温度ゆらぎ強度の式で用いる定数

定数名	C_s	C_1	C_2	C_3	C_p	C_{z1}	C_z
定数	0.11	1.44	1.90	0.70	0.15	0.62	0.13

表 2.3 レイノルズ応力の式で用いる定数

定数名		C_m	C_{R2}	C_{R3}
定数	推奨値	1.80~2.80	0.40~0.60	0.30~0.50
	AQUA 使用値	2.30	0.50	0.40

表 2.4 乱流熱流束評価式で用いる定数

定数名		C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}
定数	推奨値	3.20	0.50	0.50
	AQUA 使用値	3.20	0.50	0.50

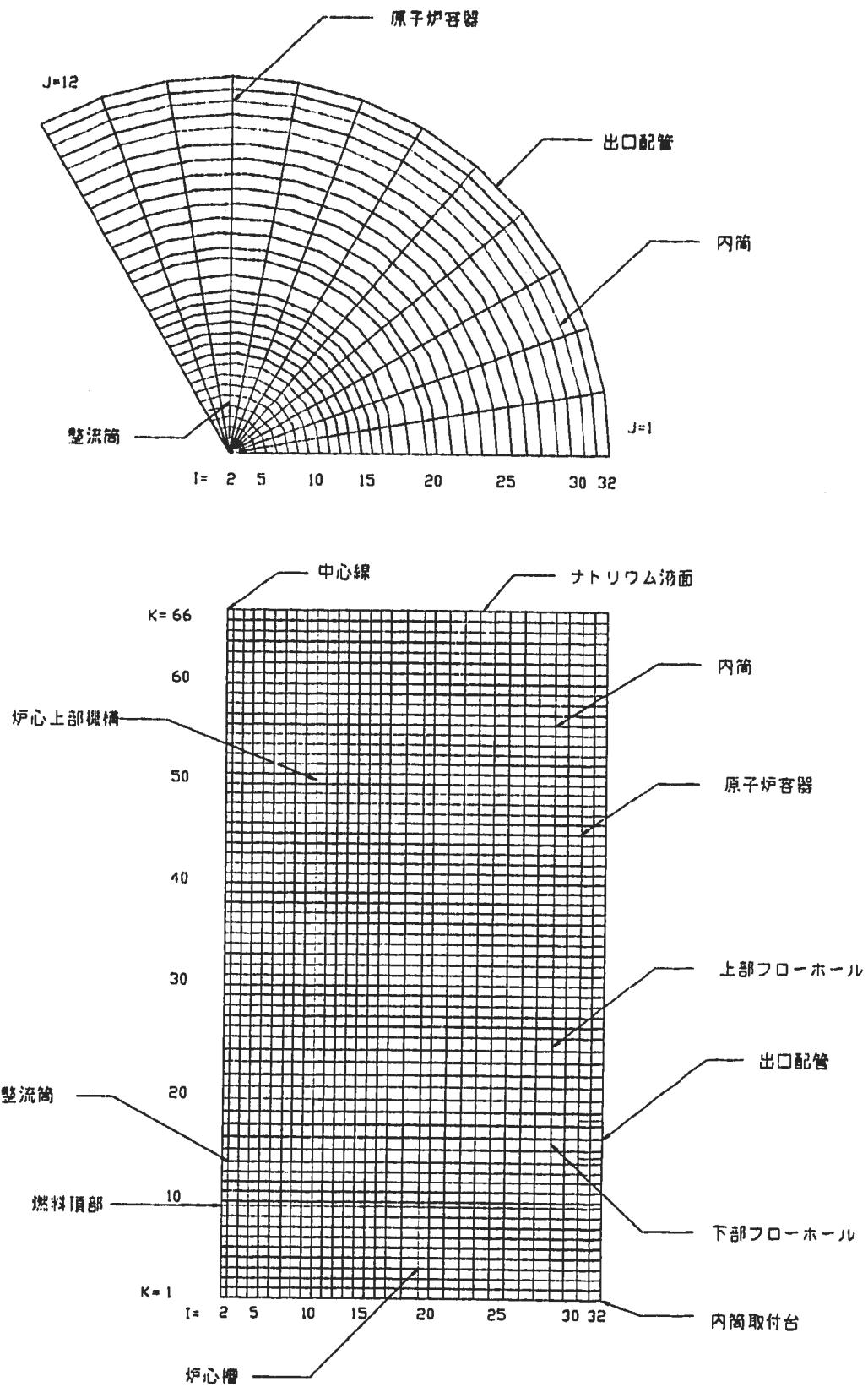
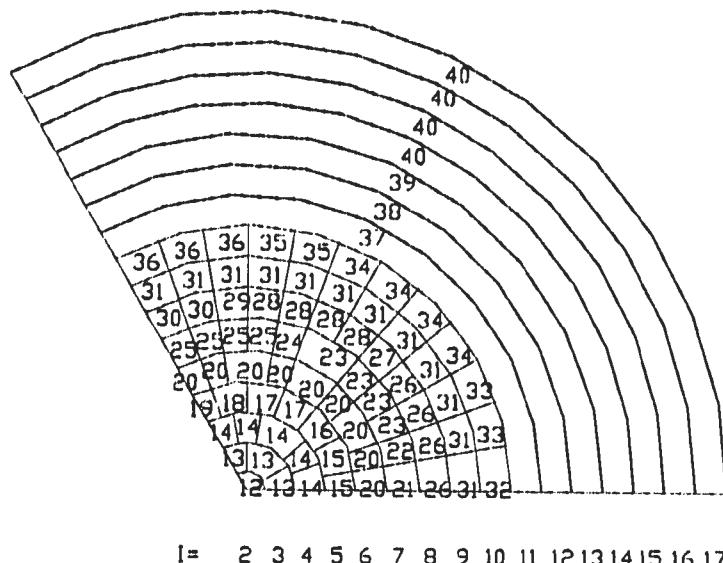


図2.1 メッシュ分割図



I= 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

表面番号	名称	流量領域	炉心列	表面番号	名称	流量領域	炉心列
12	制御棒	-	-	27	制御棒	-	-
13	内側炉心	第1	1	28	内側炉心	第5	6
14	内側炉心	第1	2	29	制御棒	-	-
15	内側炉心	第2	3	30	内側炉心	第5	6
16	制御棒	-	-	31	外側炉心	第6	7
17	内側炉心	第2	3	32	外側炉心	第8	8
18	制御棒	-	-	33	外側炉心	第8	8
19	内側炉心	第2	3	34	外側炉心	第7	8
20	内側炉心	第3	4	35	外側炉心	第7	8
21	内側炉心	第4	5	36	外側炉心	第8	8
22	制御棒	-	-	37	ブランケット	第9	9
23	内側炉心	第4	5	38	ブランケット	第10	10
24	制御棒	-	-	39	ブランケット	第11	11
25	内側炉心	第4	5	40	反射体	-	-
26	内側炉心	第4	5				

図 2.2 炉心領域分割図

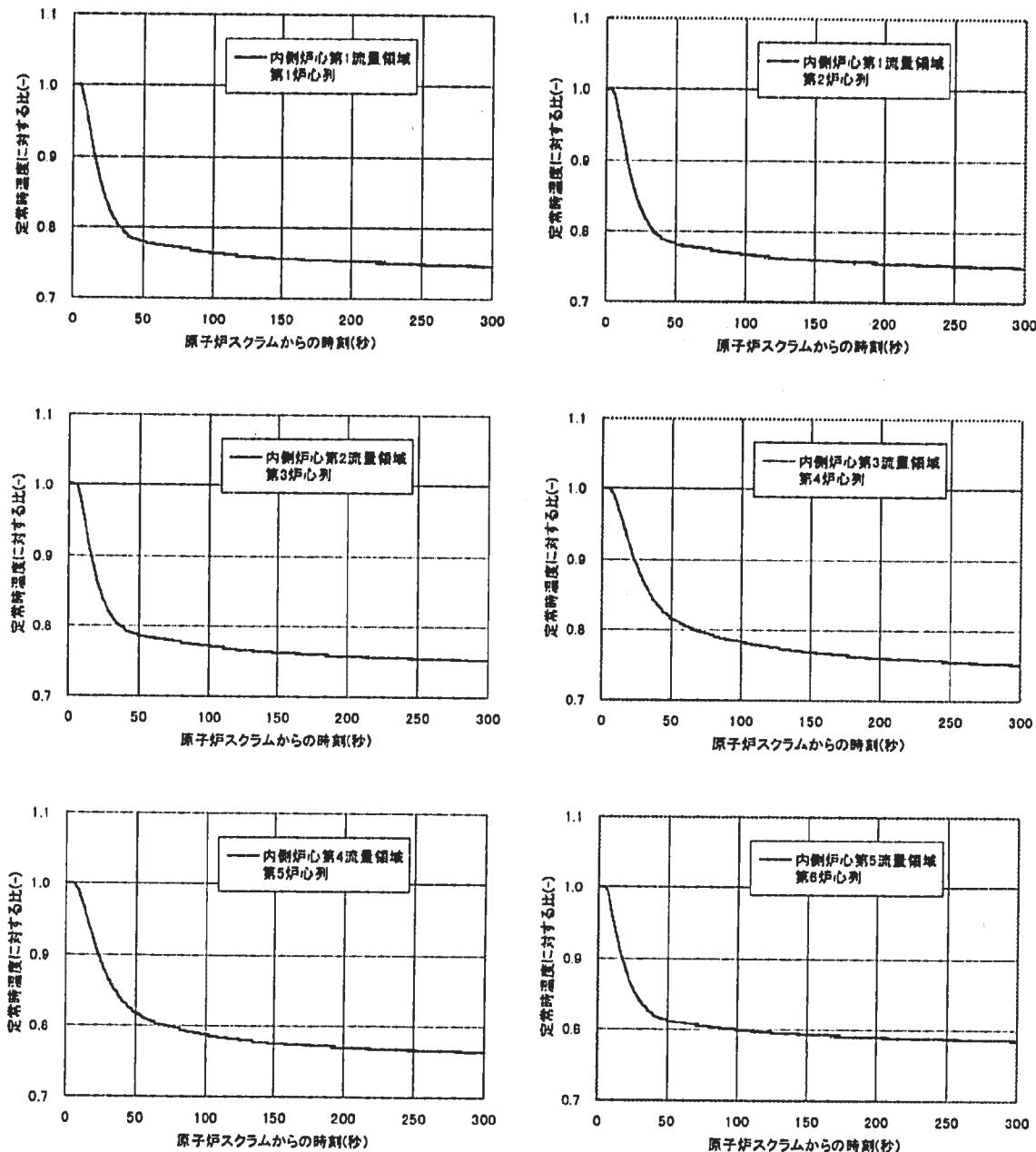


図 2.3(1/2) 過渡時の炉心出口冷却材温度の時間変化

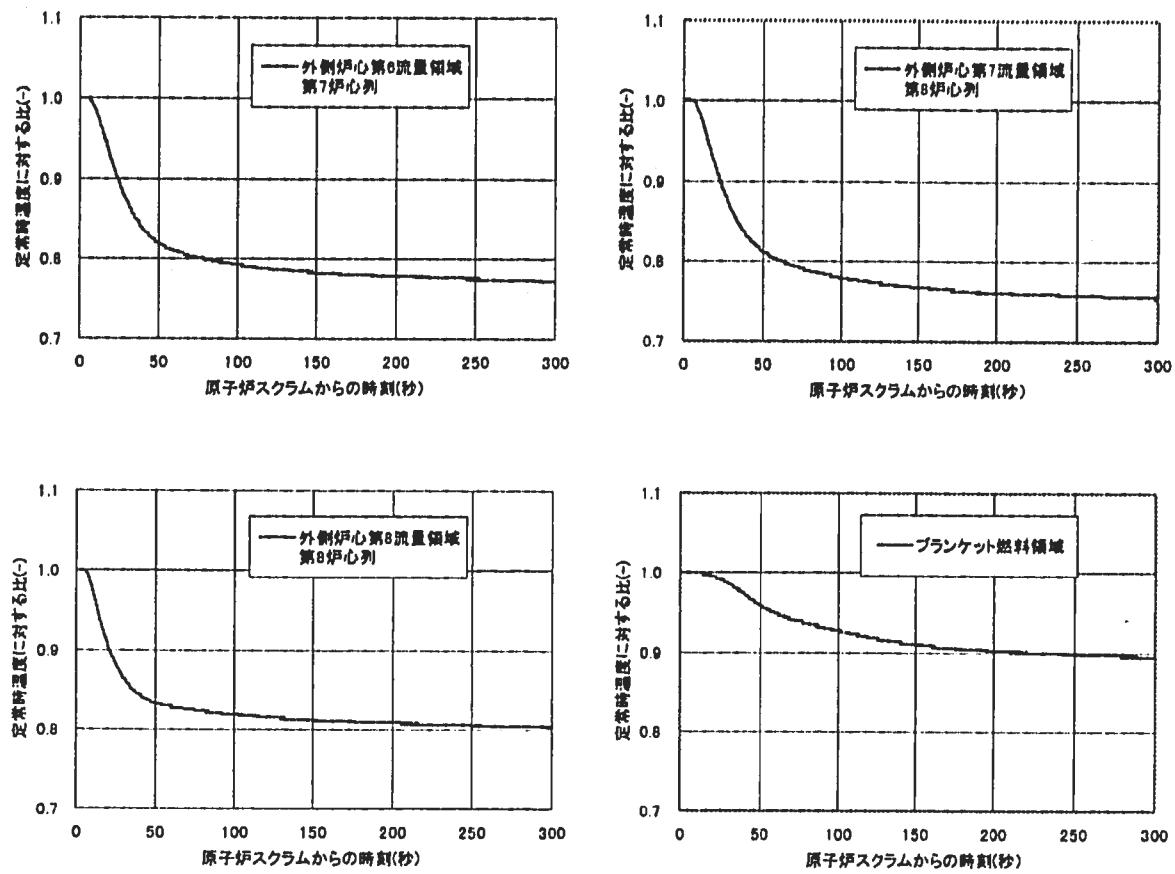


図 2.3(2/2) 過渡時の炉心出口冷却材温度の時間変化

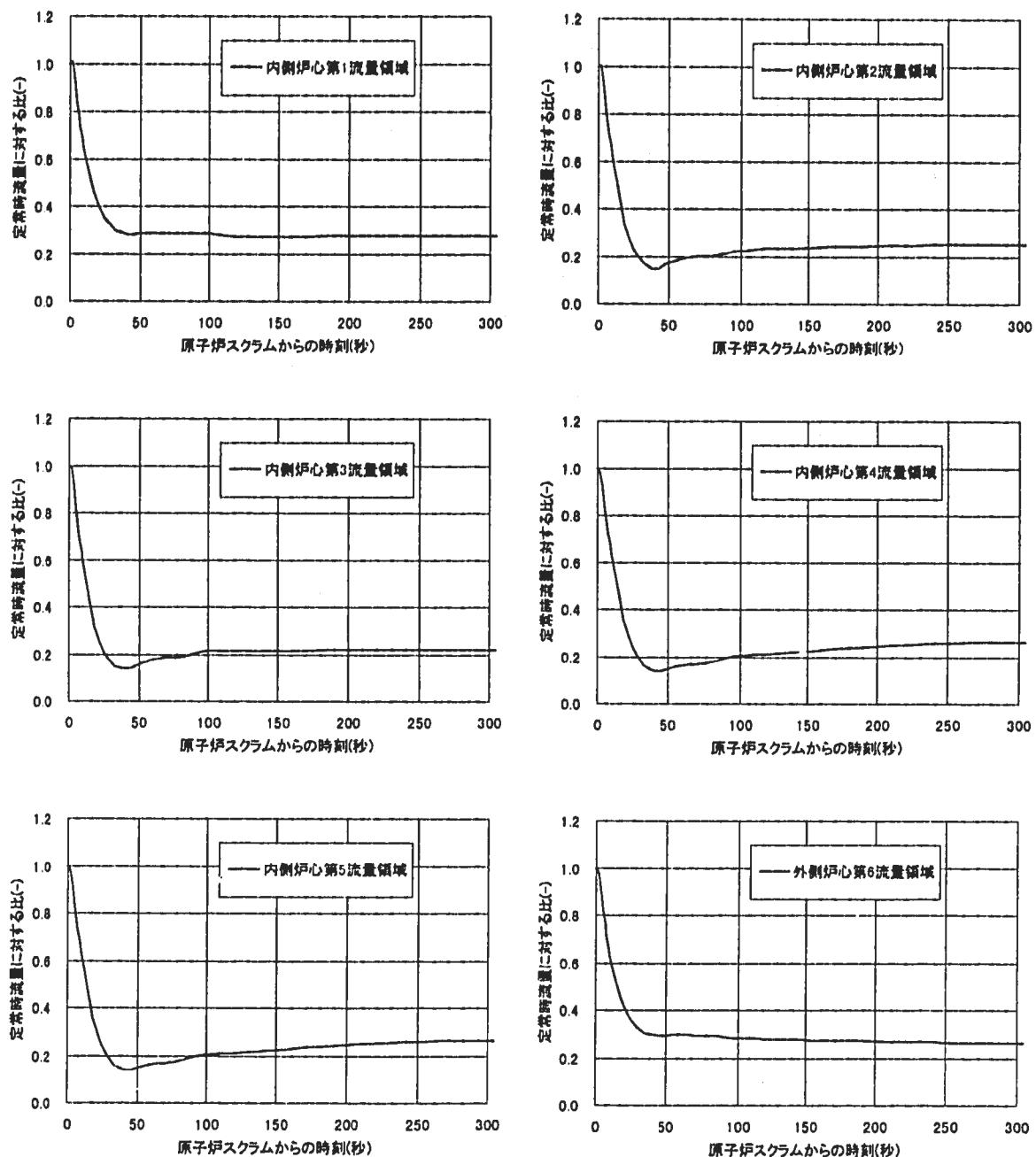


図 2.4(1/2) 過渡時の炉心出口冷却材流量の時間変化

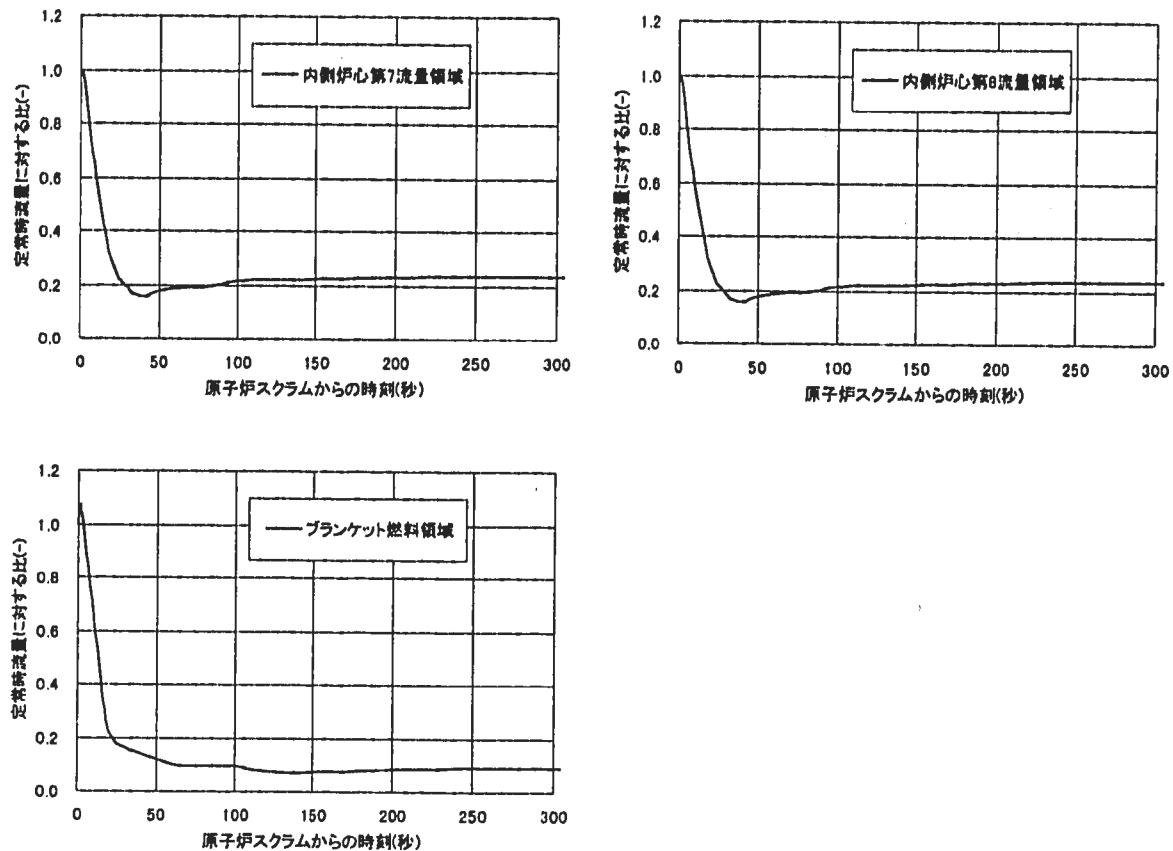


図 2.4(2/2) 過渡時の炉心出口冷却材流量の時間変化

- 26 -

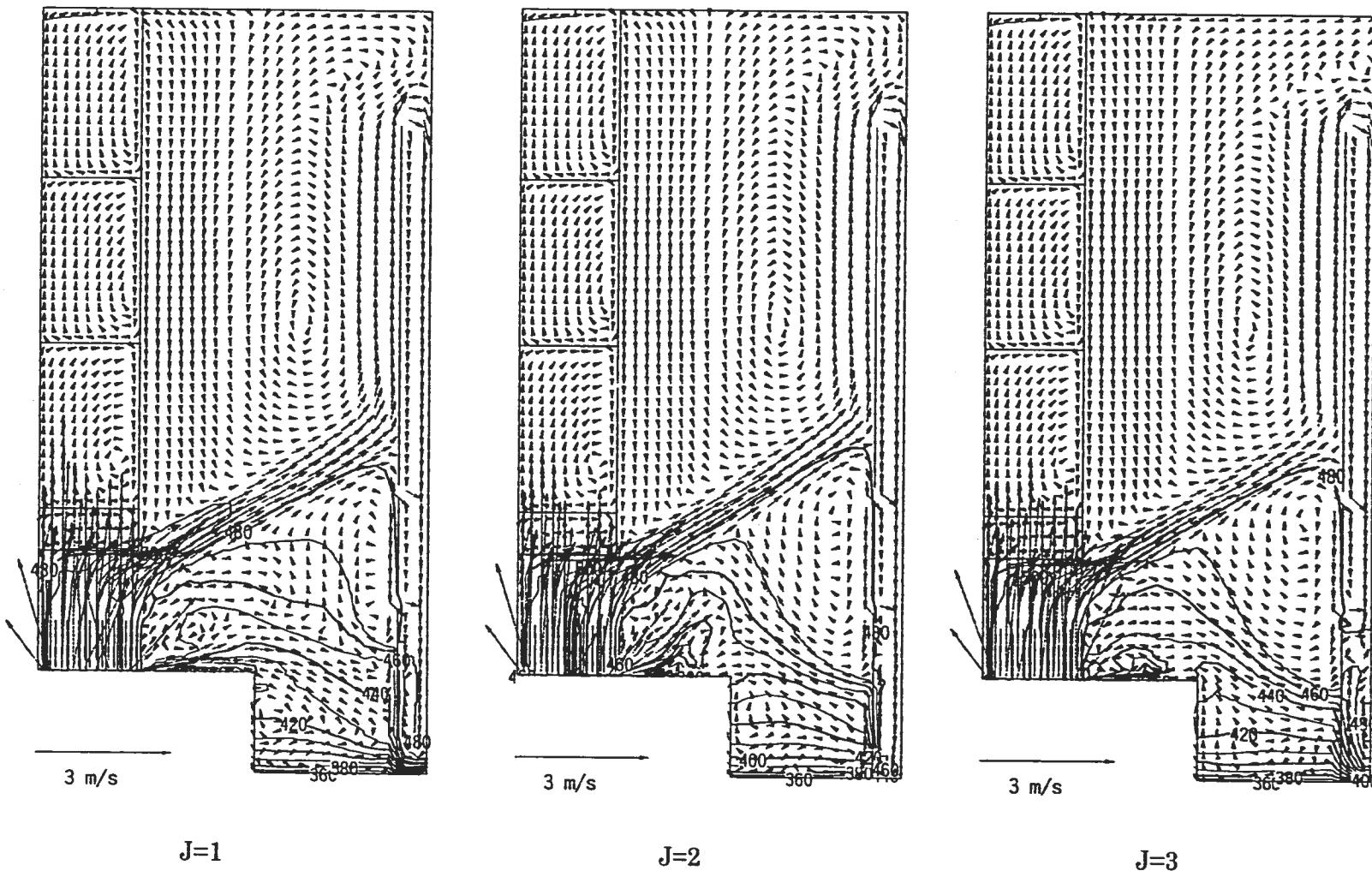


図 3.1(1/4) ASM による定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)

- 27 -

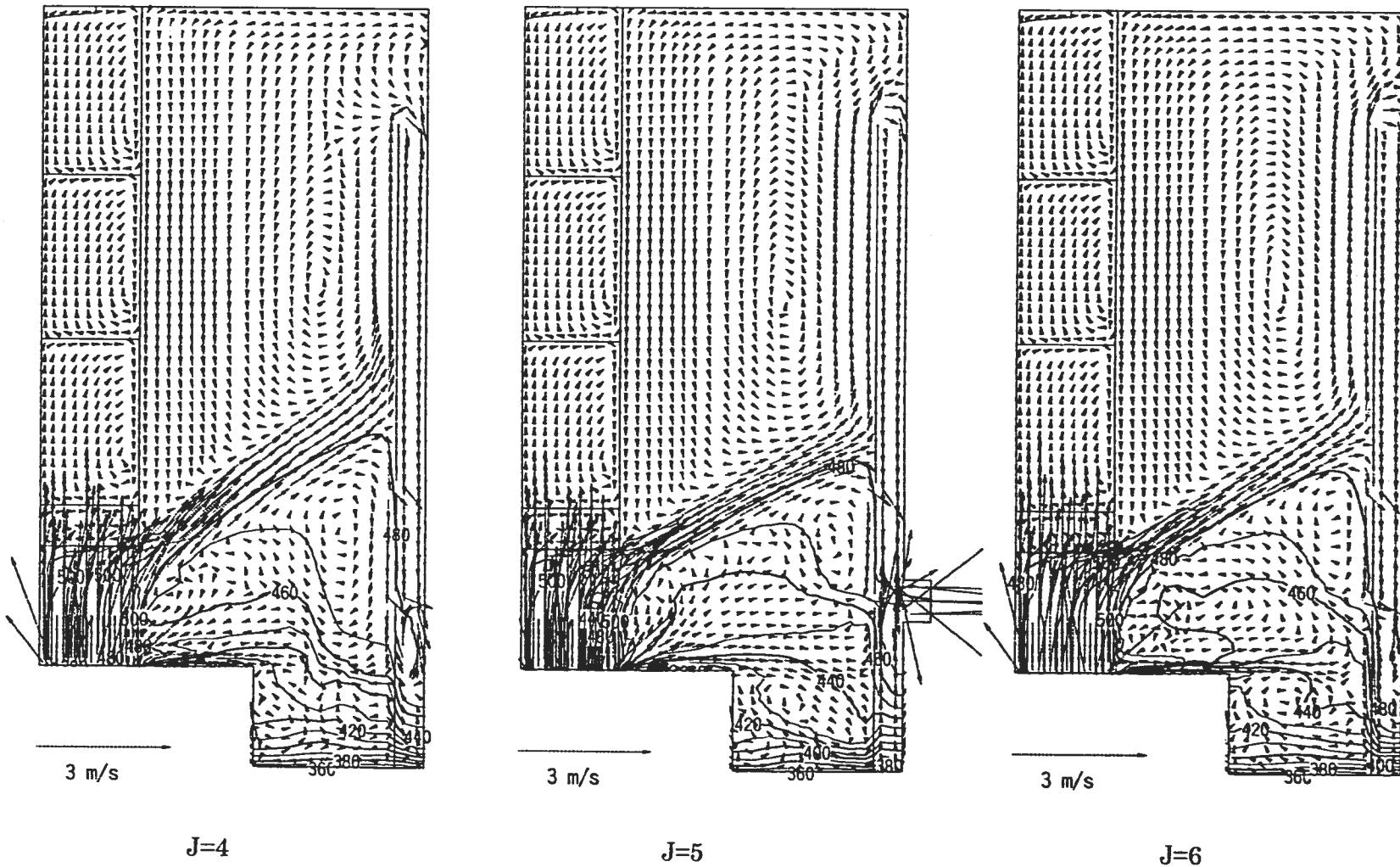


図 3.1(2/4) ASM による定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)

- 28 -

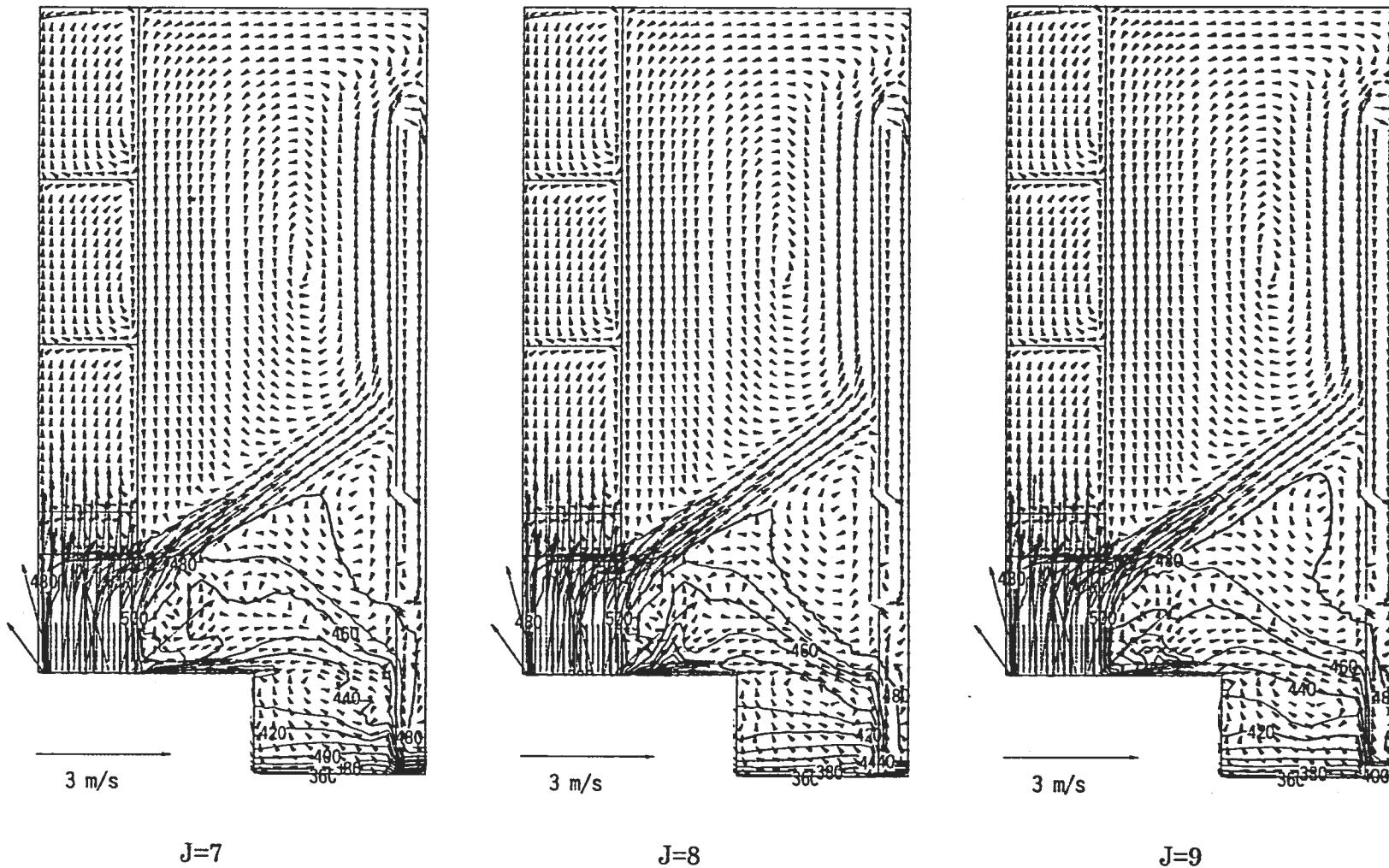


図 3.1(3/4) ASM による定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)

- 29 -

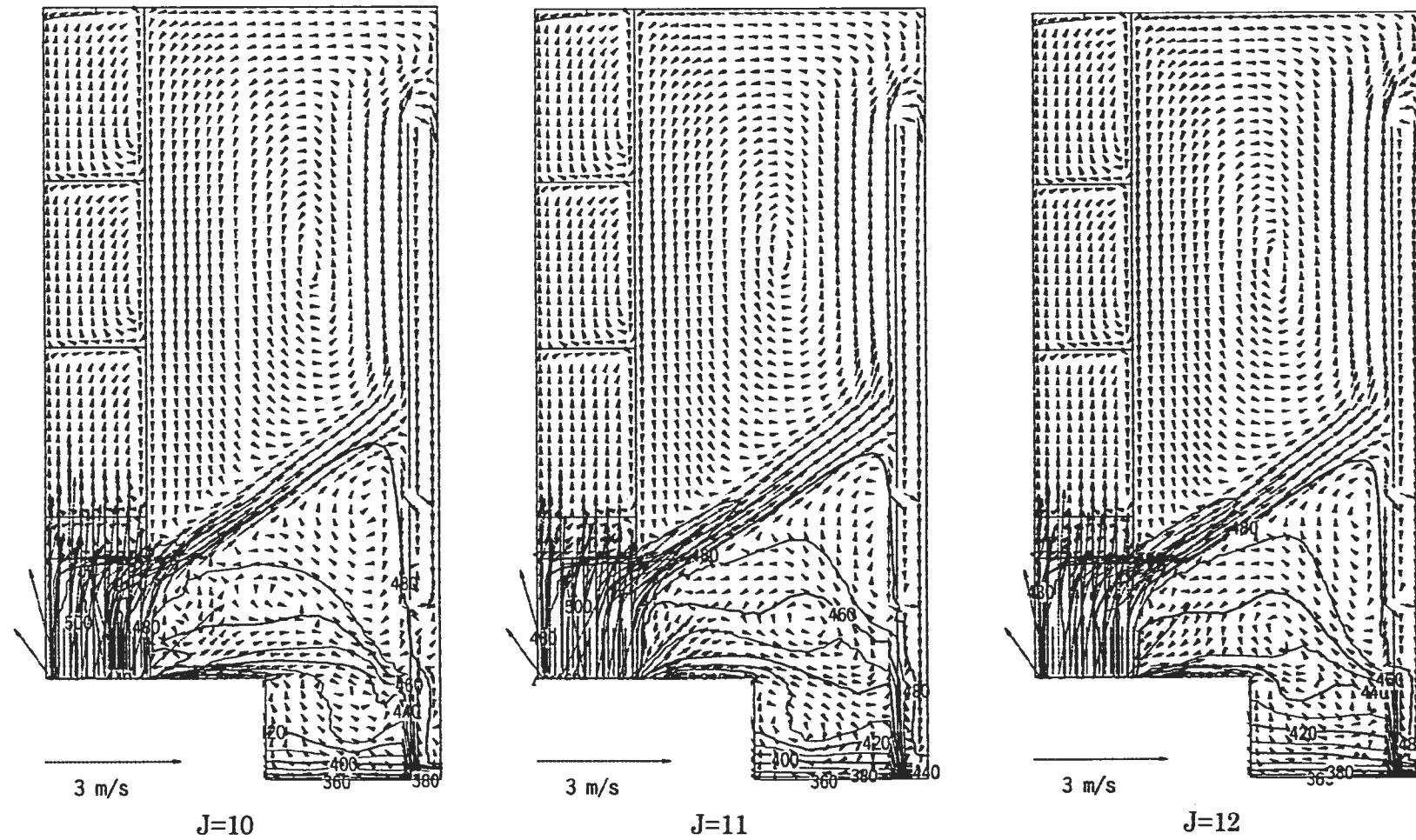
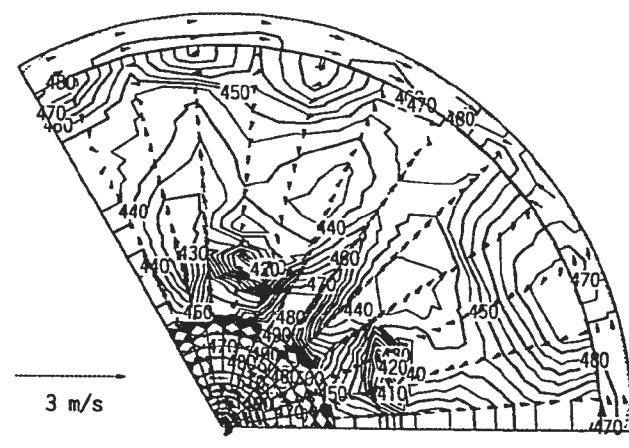
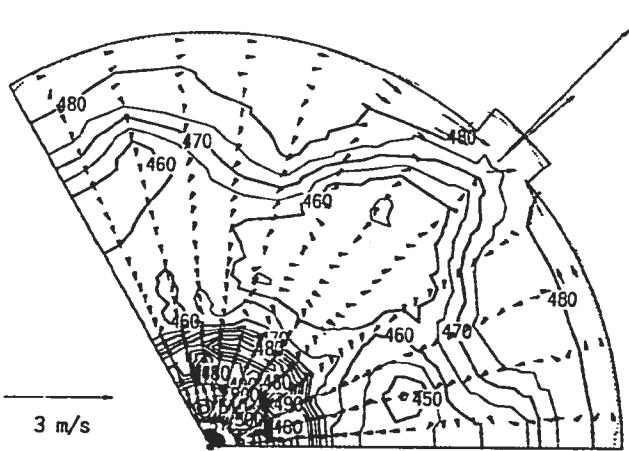


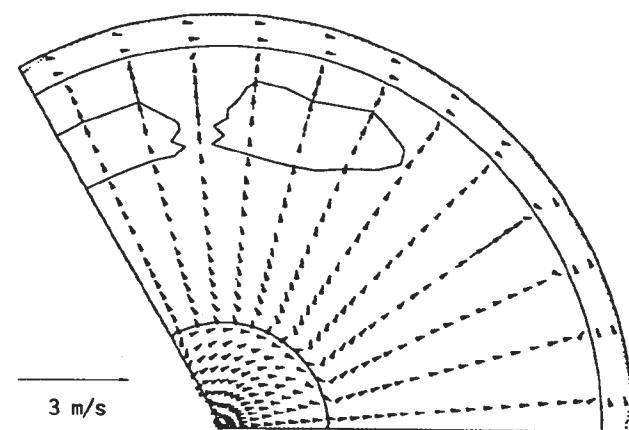
図 3.1(4/4) ASM による定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)



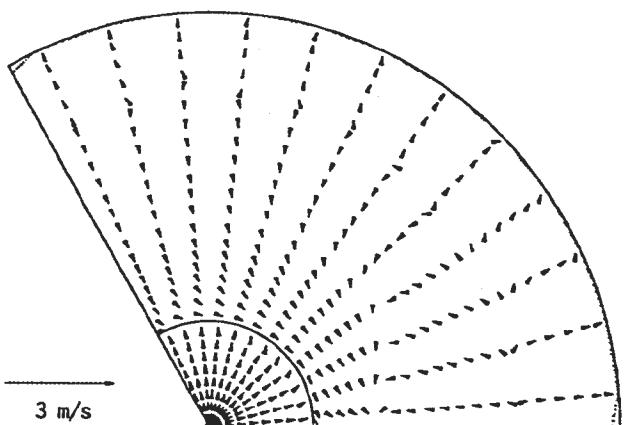
K=11



K=16



K=30



K=60

図 3.2 ASM による定常時解析結果 ($r-\theta$ 面内流速分布および温度分布)

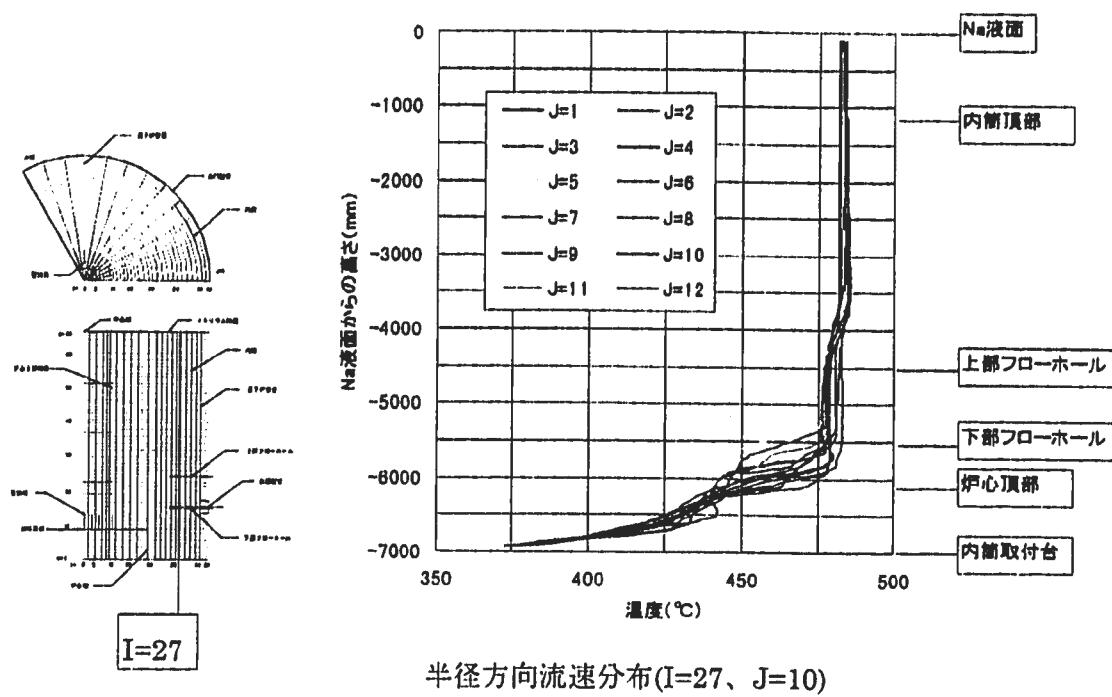


図 3.3 ASM による定常時解析結果（各周方向断面での軸方向温度分布）

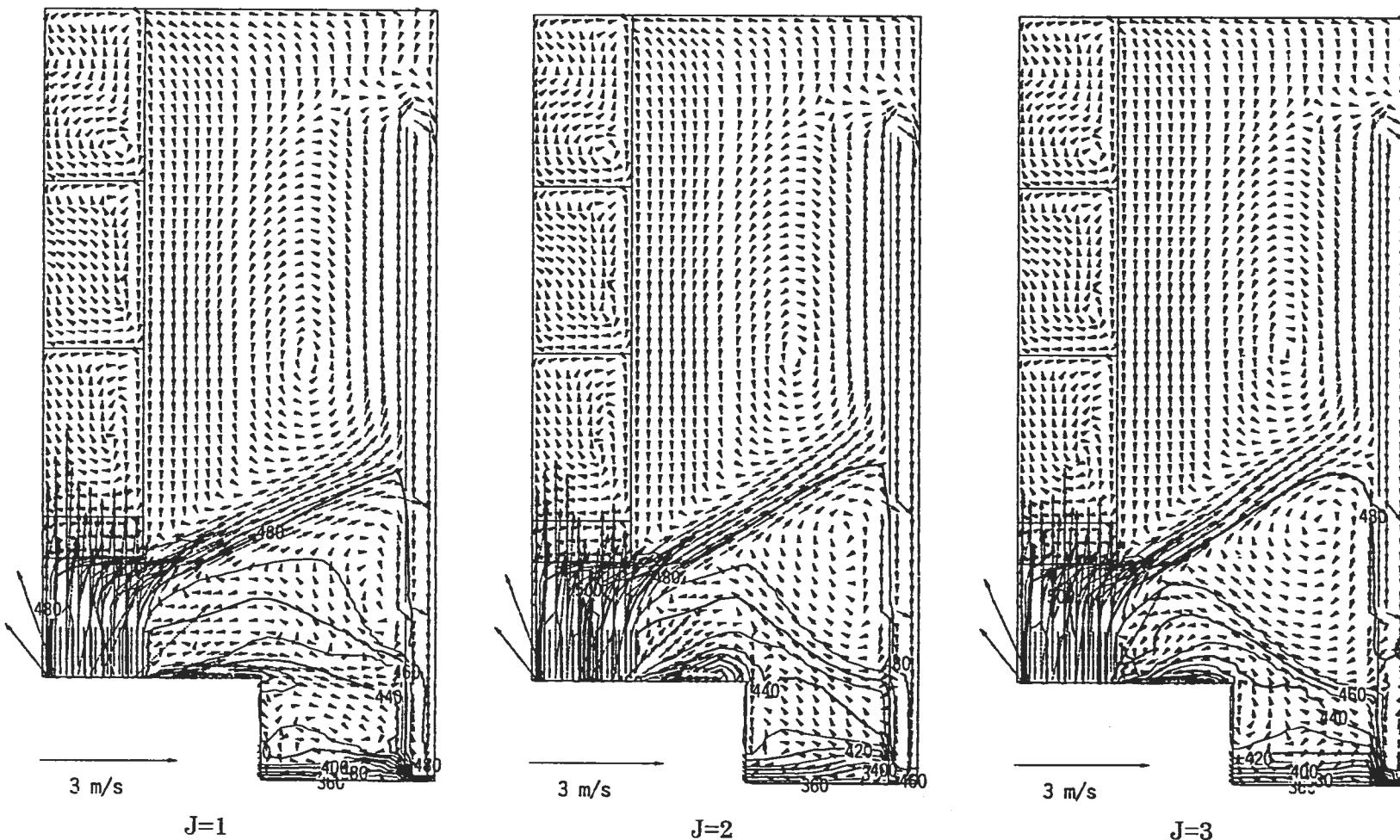


図 3.4(1/4) $k-\epsilon$ モデルによる定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)

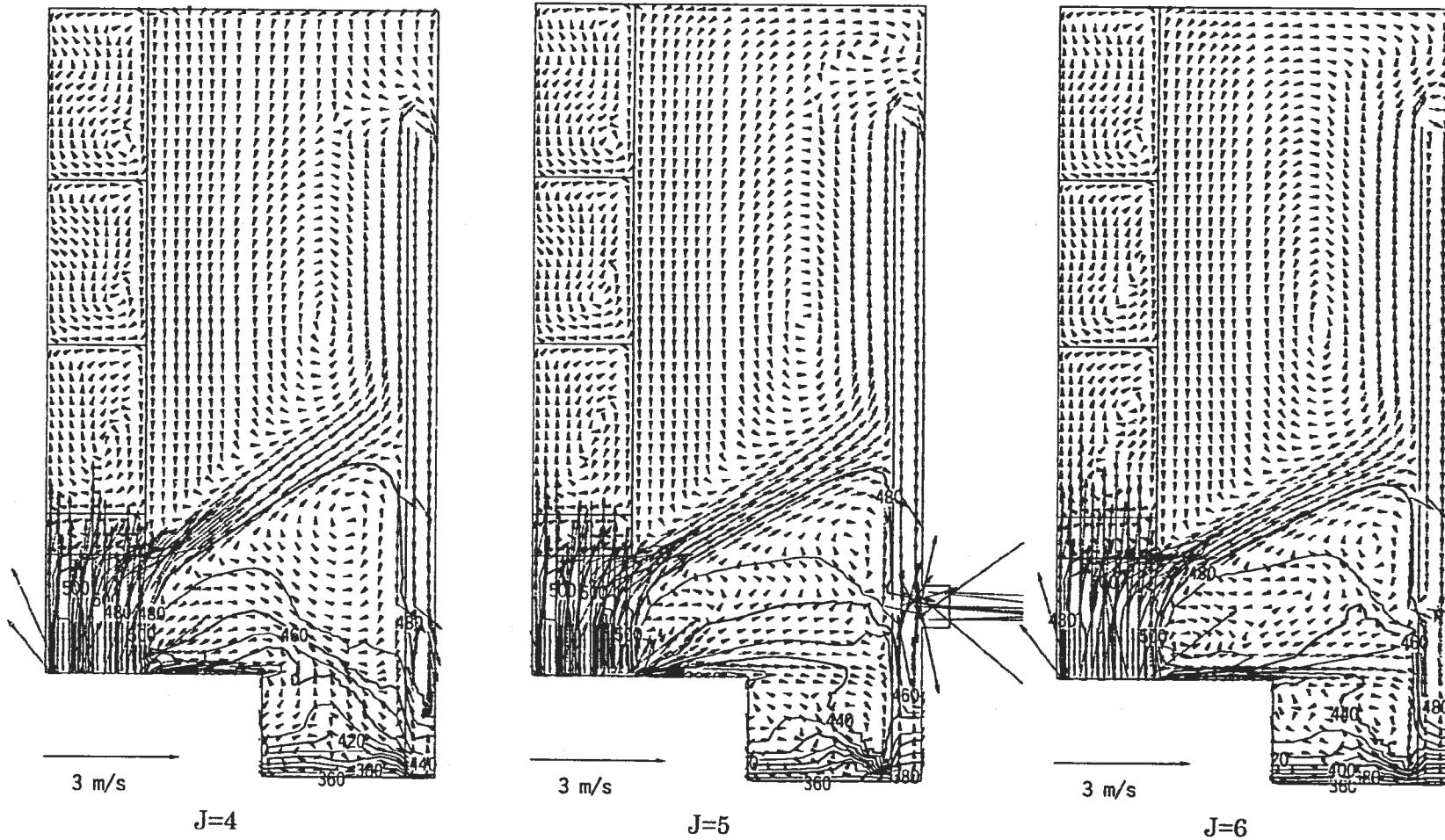


図 3.4(2/4) $k-\epsilon$ モデルによる定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)

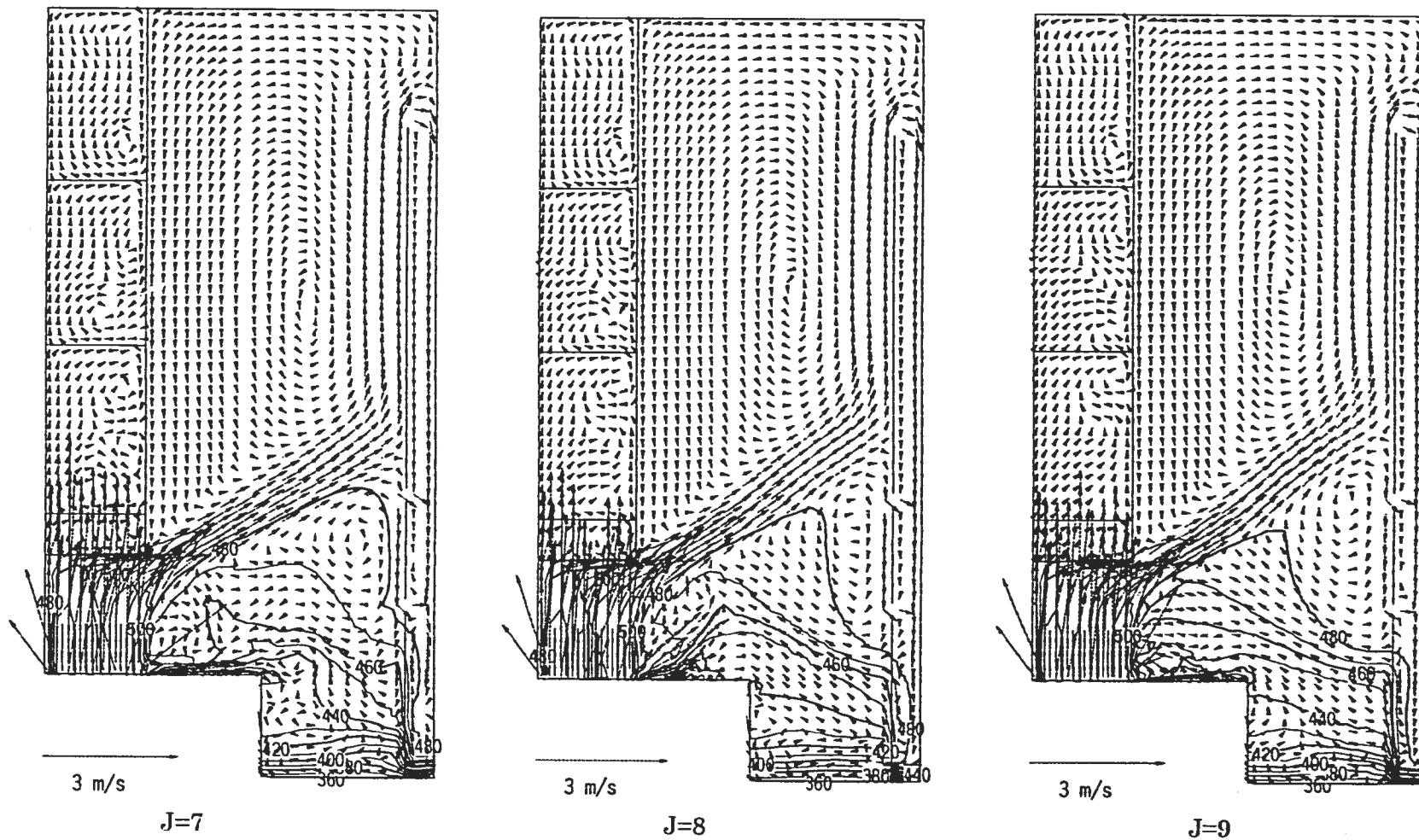


図 3.4(3/4) $k-\epsilon$ モデルによる定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)

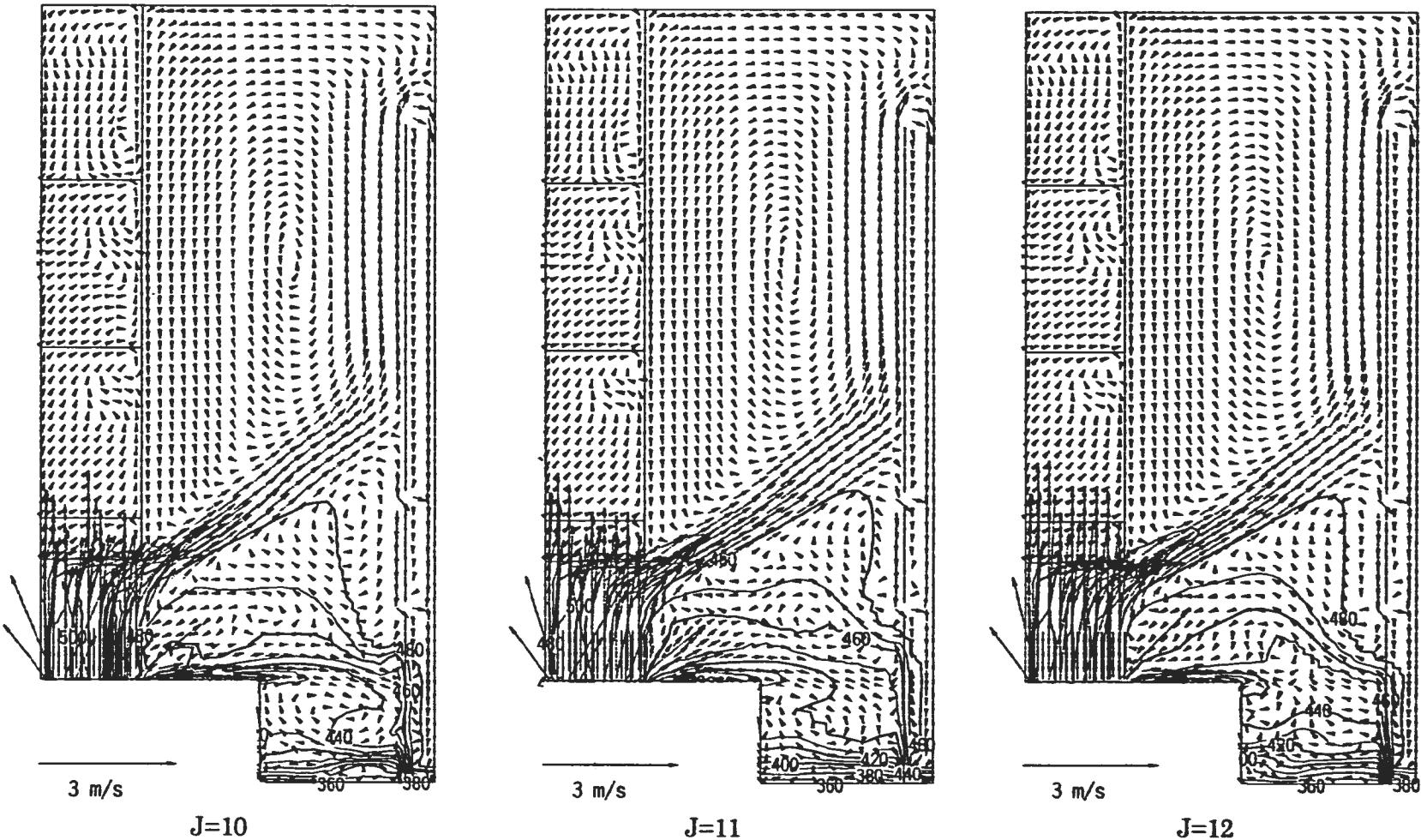


図 3.4(4/4) $k-\epsilon$ モデルによる定常時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布)

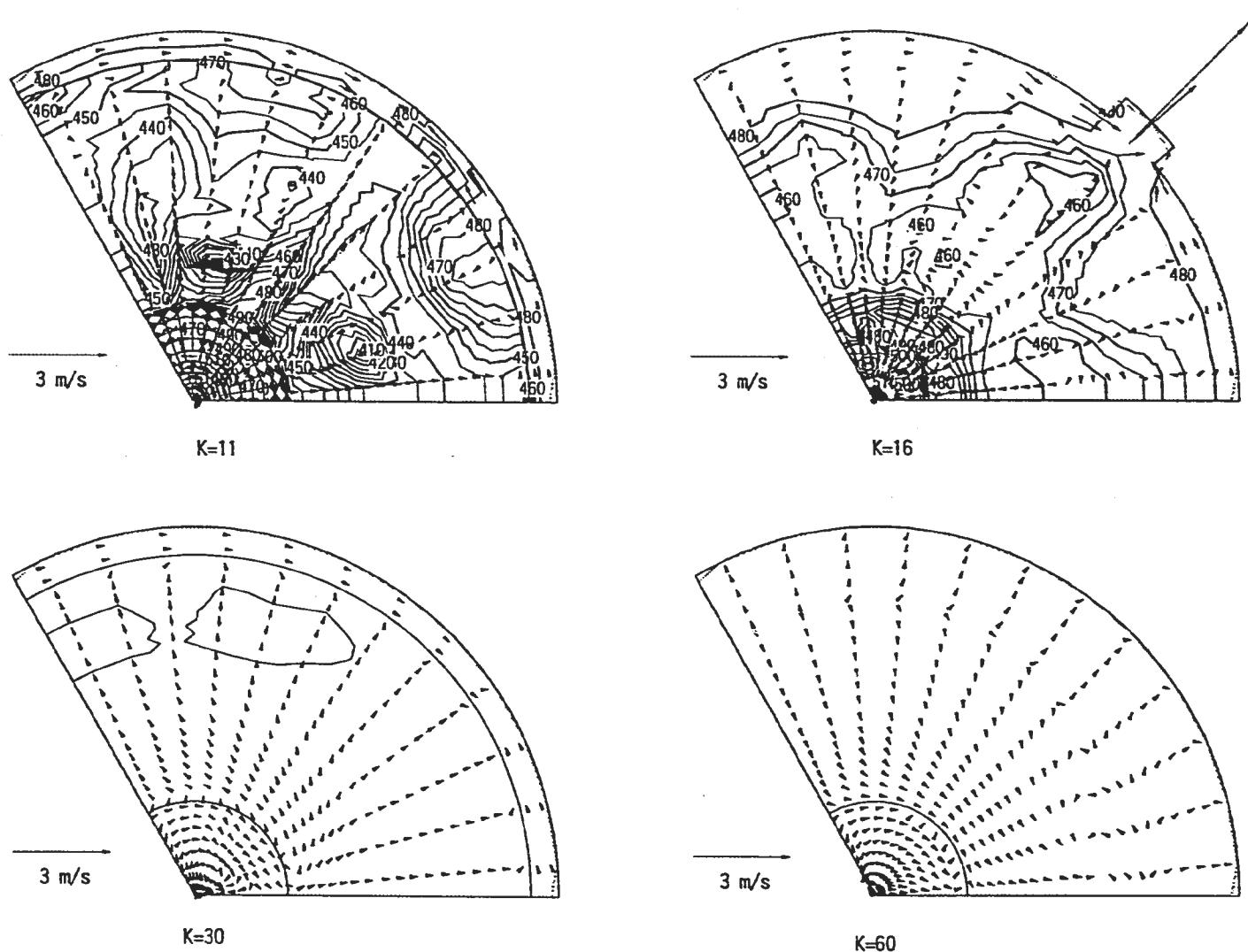


図 3.5 $k-\epsilon$ モデルによる定常時解析結果 ($r-\theta$ 面内流速分布および温度分布)

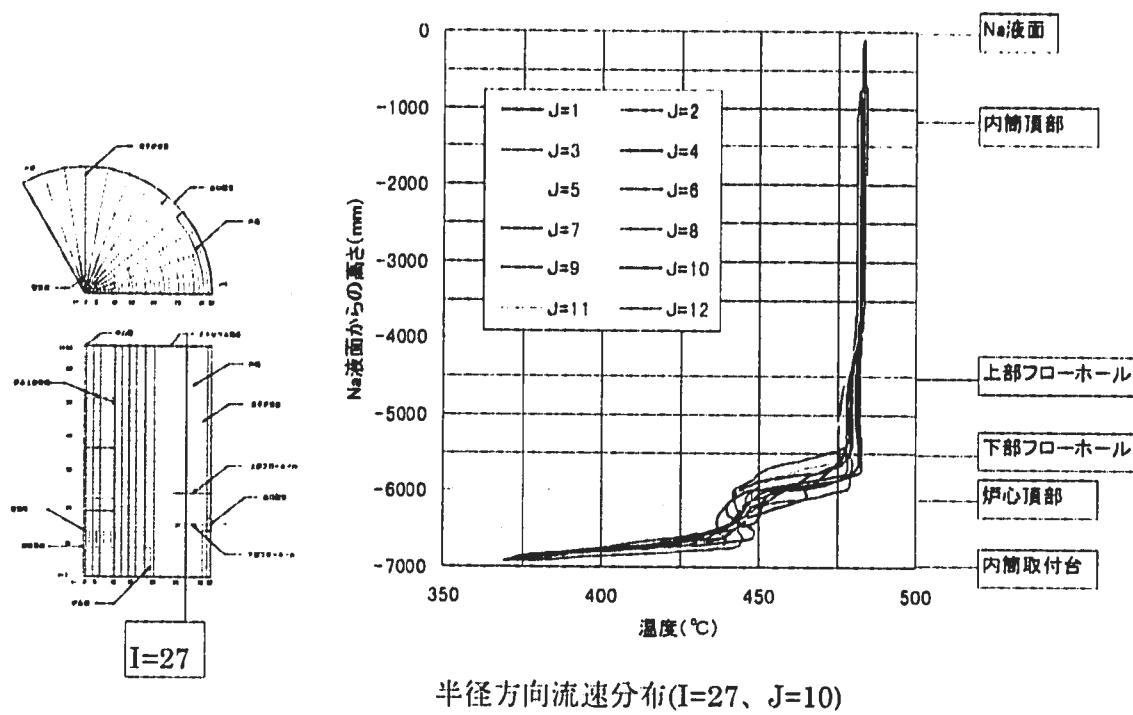


図 3.6 $k-\varepsilon$ モデルによる解析結果（各周方向断面での軸方向温度分布）

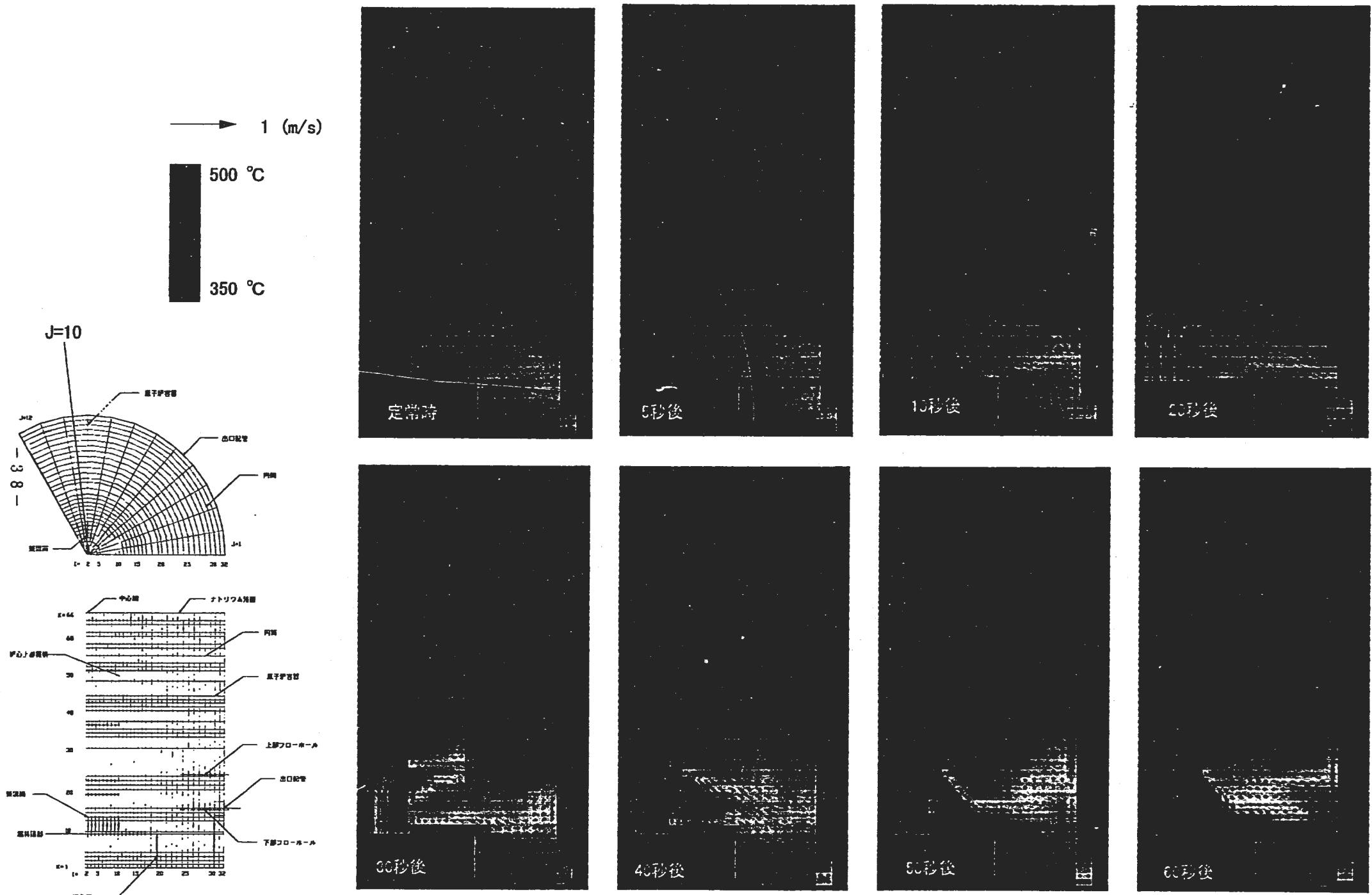


図3.7(1/3) ASMIによる過渡時解析結果 (r - Z 面内流速分布および温度分布) (定常時から原子炉スクラムから60秒後)

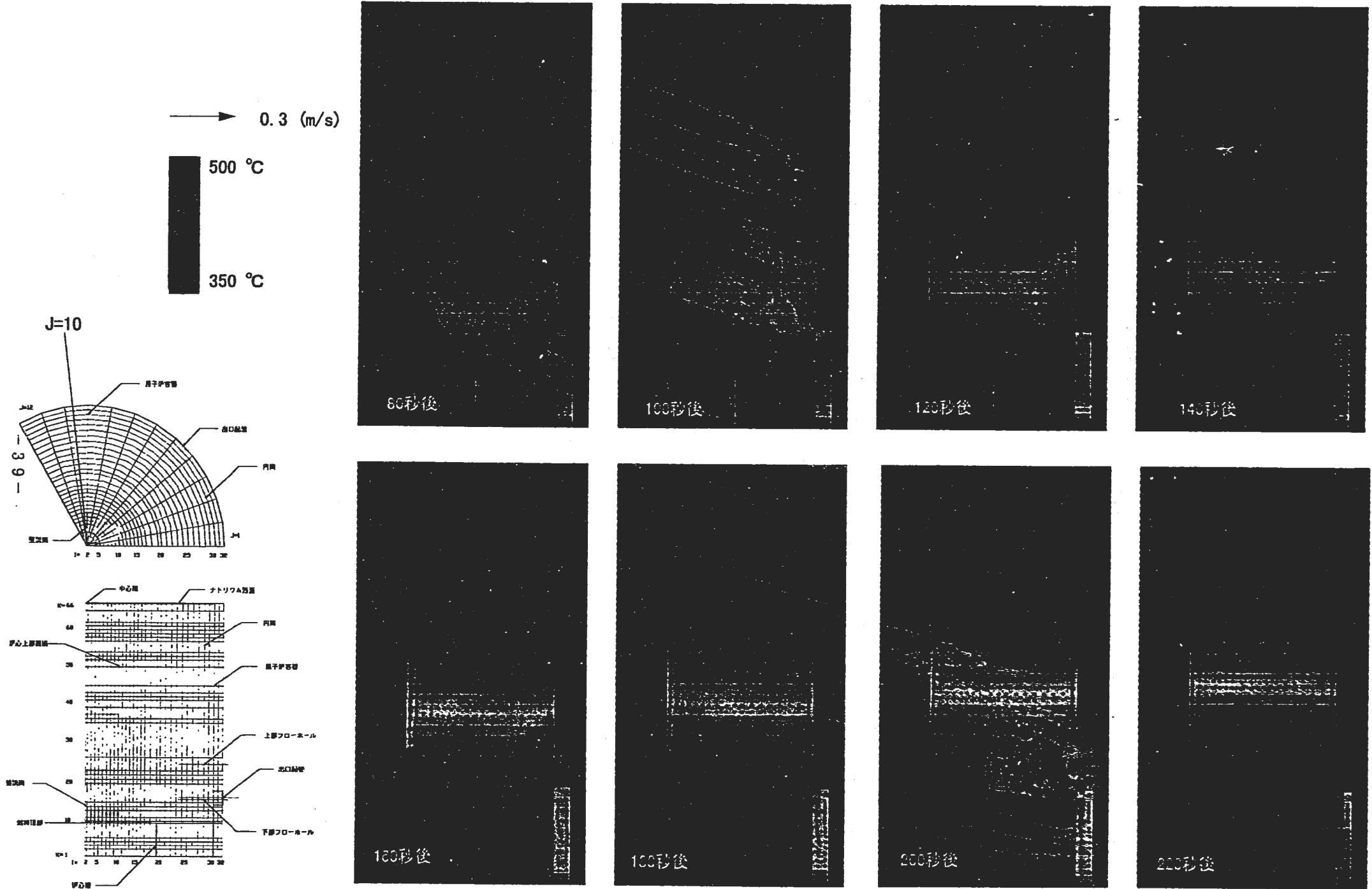


図3.7(2/3) ASMによる過渡時解析結果 (r-Z面内流速分布および温度分布) (原子炉スクラムから80秒後から原子炉スクラムから220秒後)

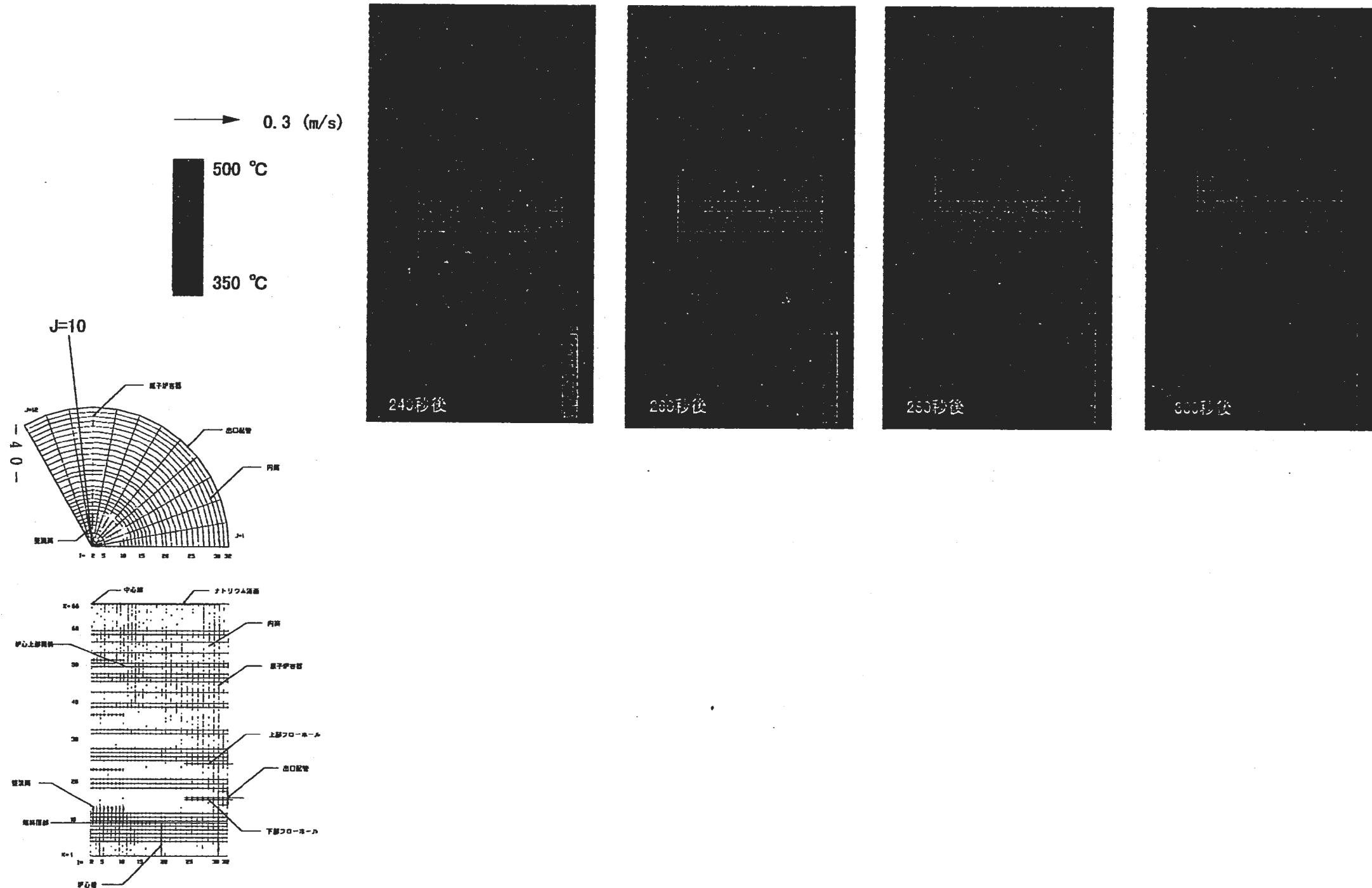


図3.7(3/3) ASIによる過渡時解析結果 (r-Z面内流速分布および温度分布) (原子炉スクラムから240秒後から原子炉スクラムから300秒後)

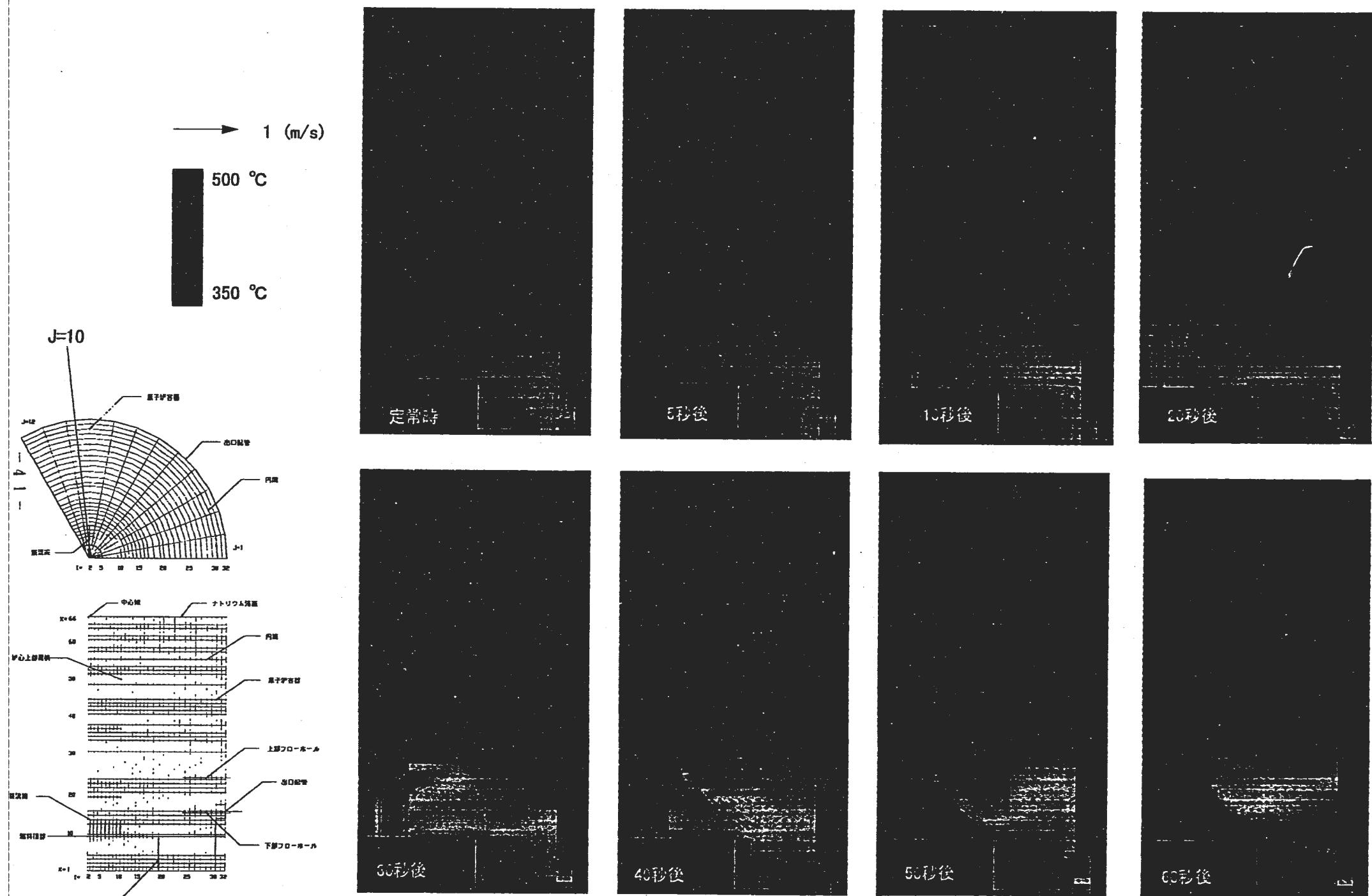


図3.8(1/3) $k-\varepsilon$ モデルによる過渡時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布) (定常時から原子炉スクラムから60秒後)

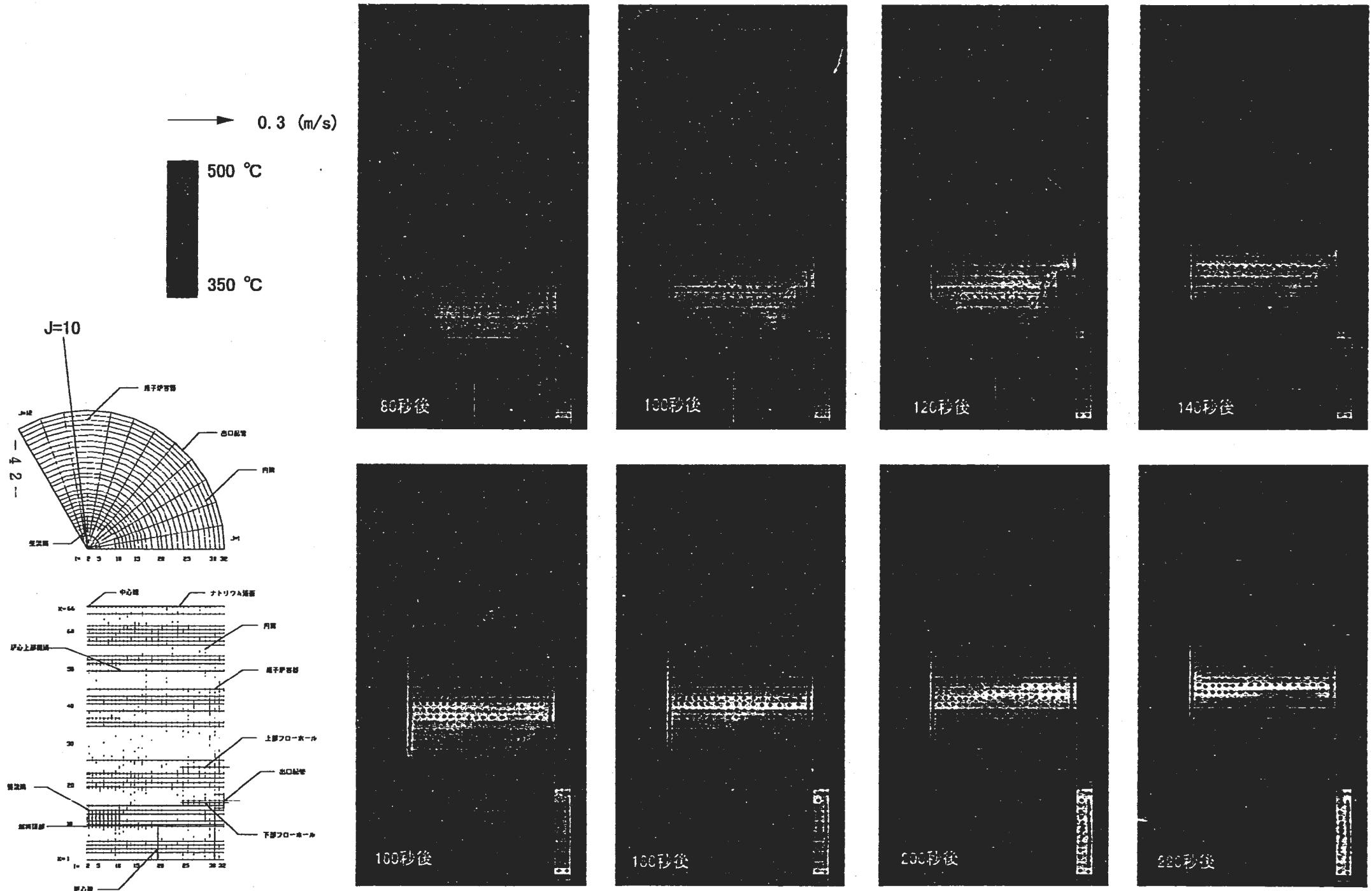


図3.8(2/3) $k-\varepsilon$ モデルによる過渡時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布) (原子炉スクラムから80秒後から原子炉スクラムから220秒後)

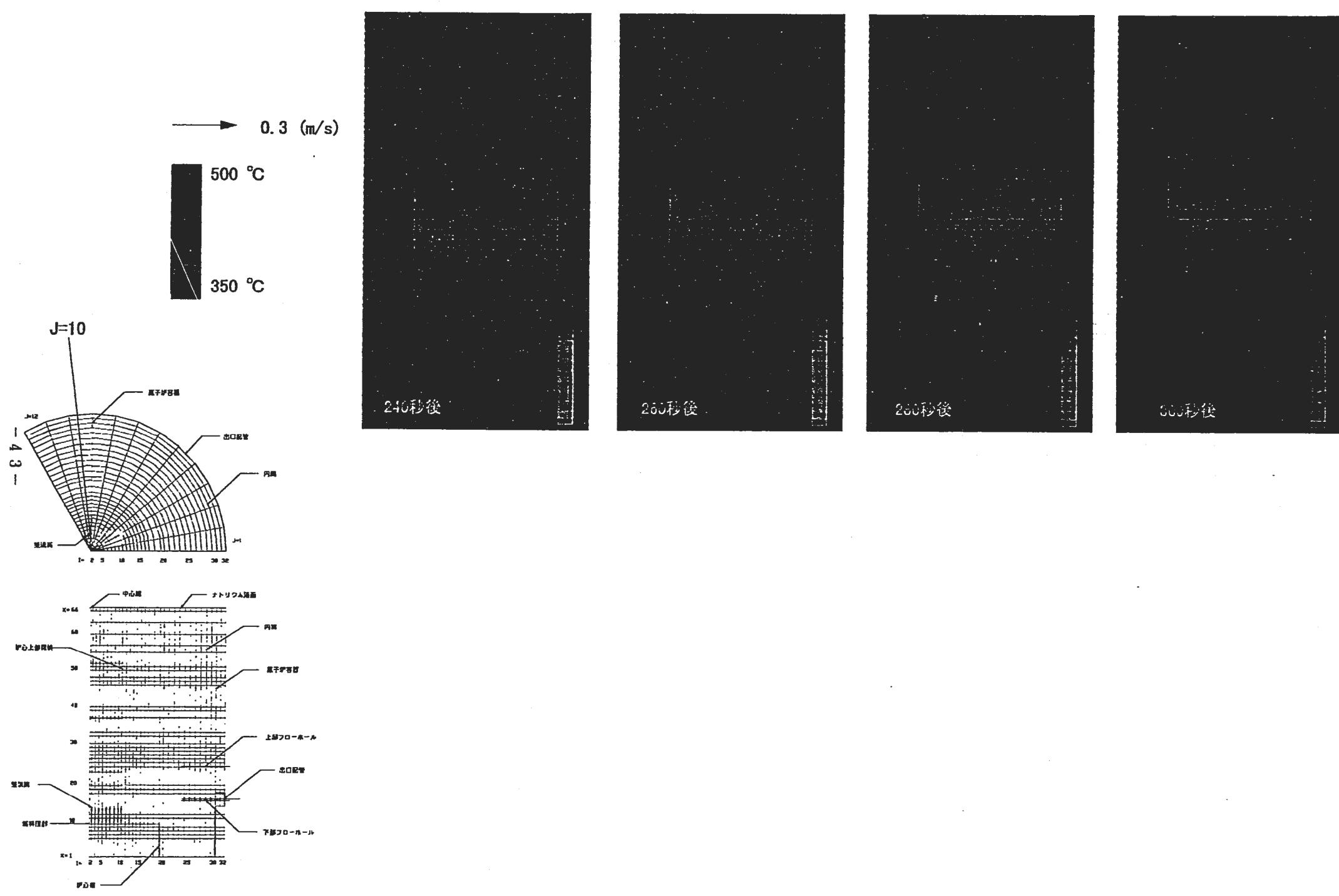
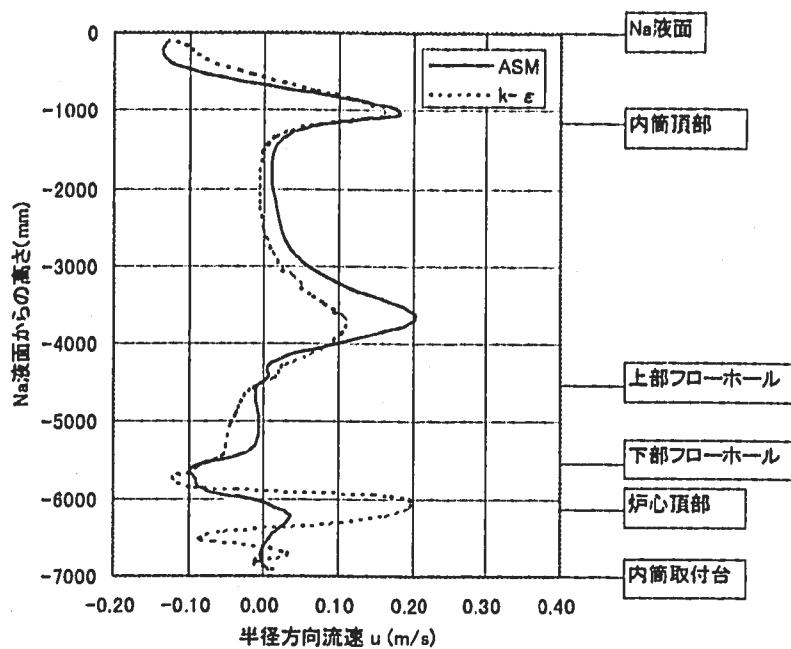
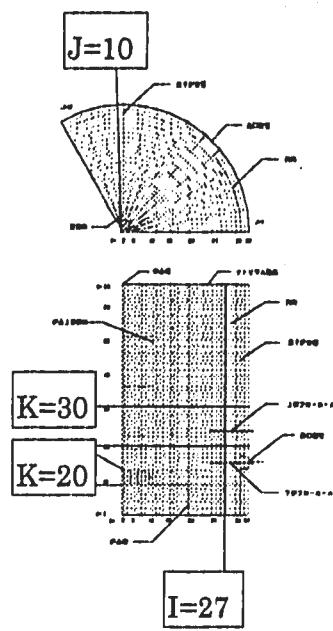
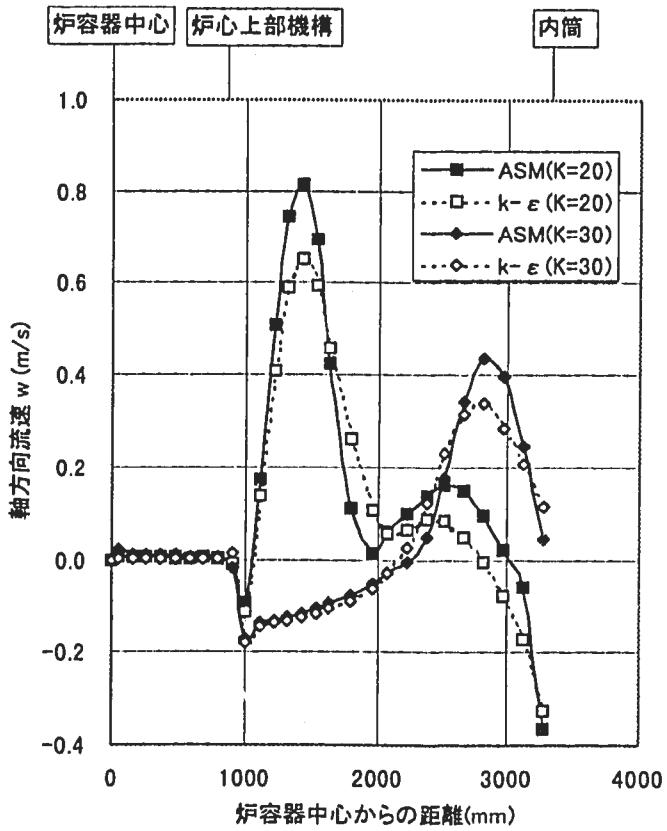


図3.8(3/3) $k-\varepsilon$ モデルによる過渡時解析結果 ($r-Z$ 面内流速分布および温度分布) (原子炉スクラムから240秒後から原子炉スクラムから300秒後)

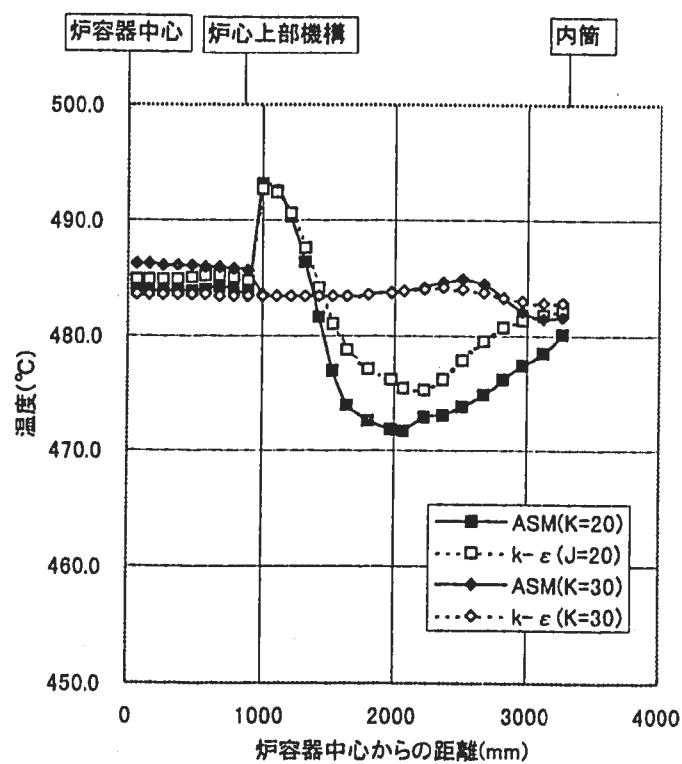
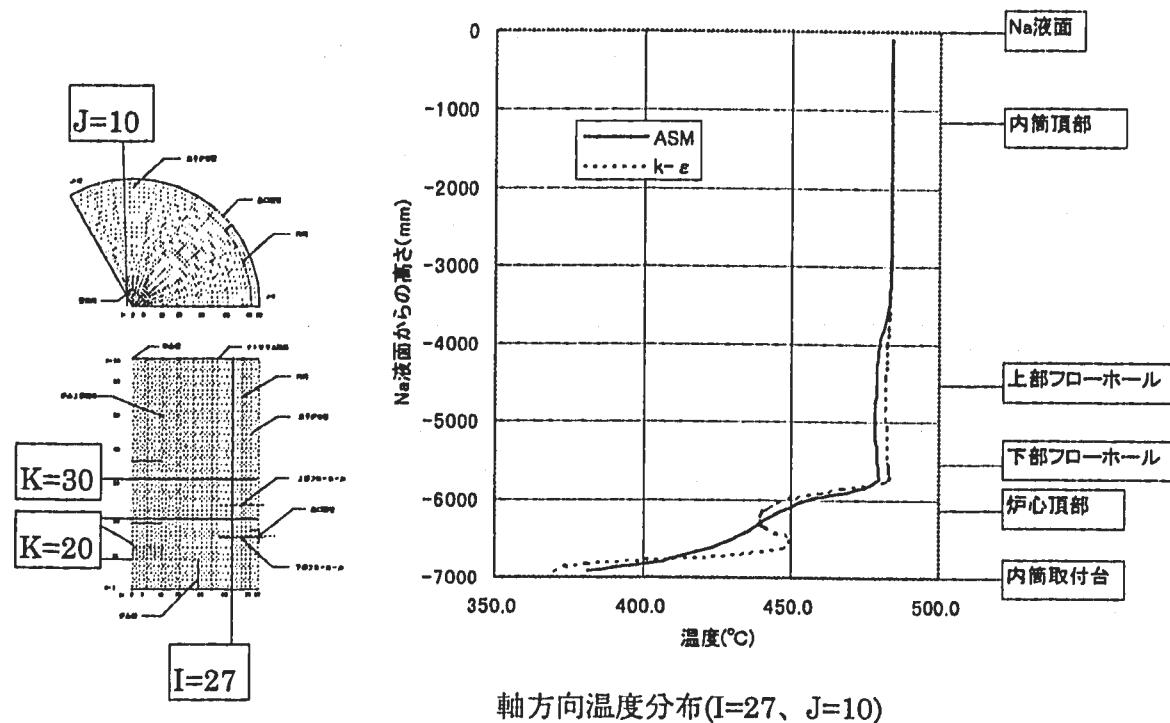


半径方向流速分布(I=27、J=10)



軸方向流速分布(J=10、K=20、30)

図 3.9 定常時の半径方向流速分布と軸方向流速分布



半径方向温度分布(J=10、K=20、30)

図 3.10 定常時の半径方向温度分布と軸方向温度分布

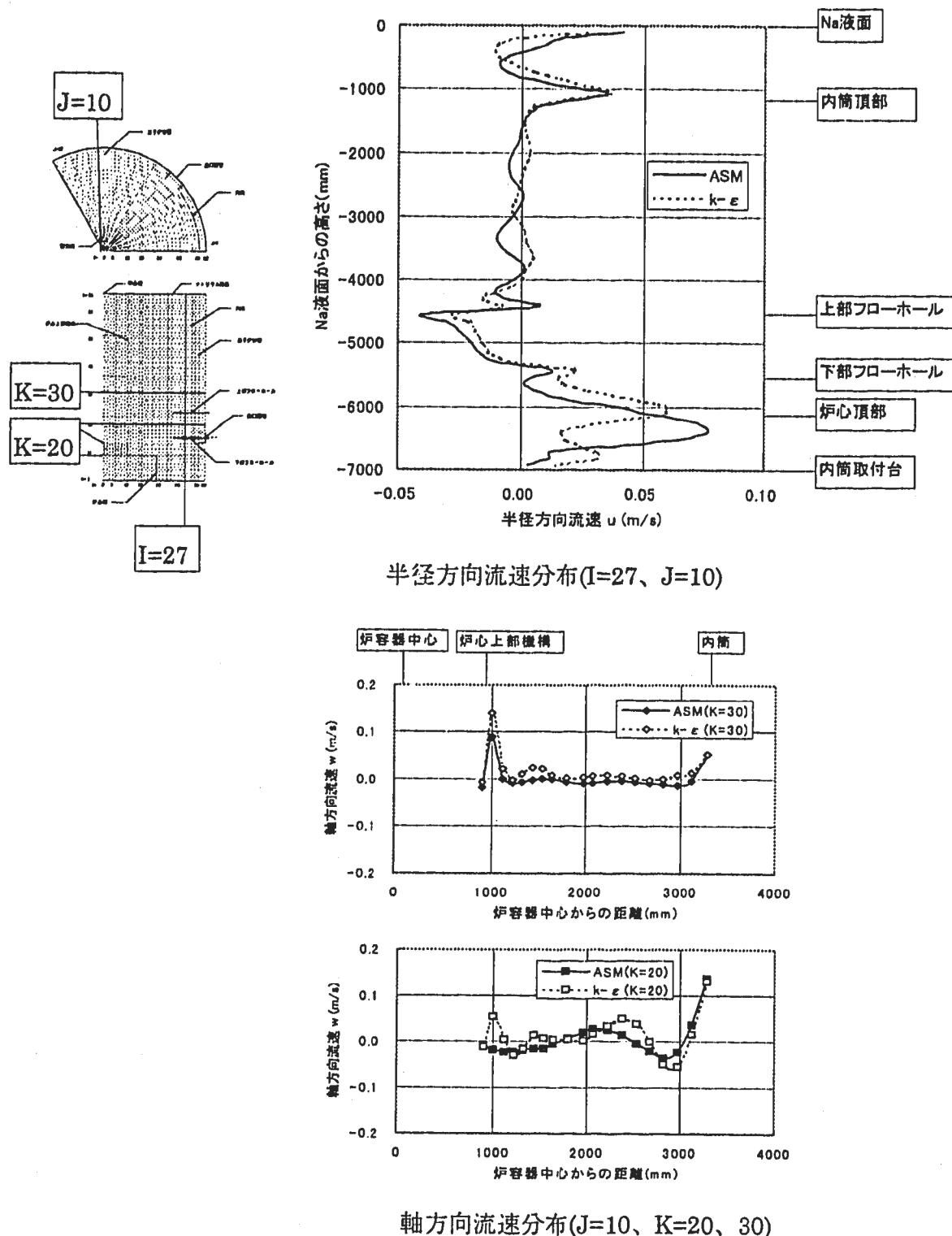


図 3.11 原子炉スクラムから 180 秒後の半径方向流速分布と軸方向流速分布

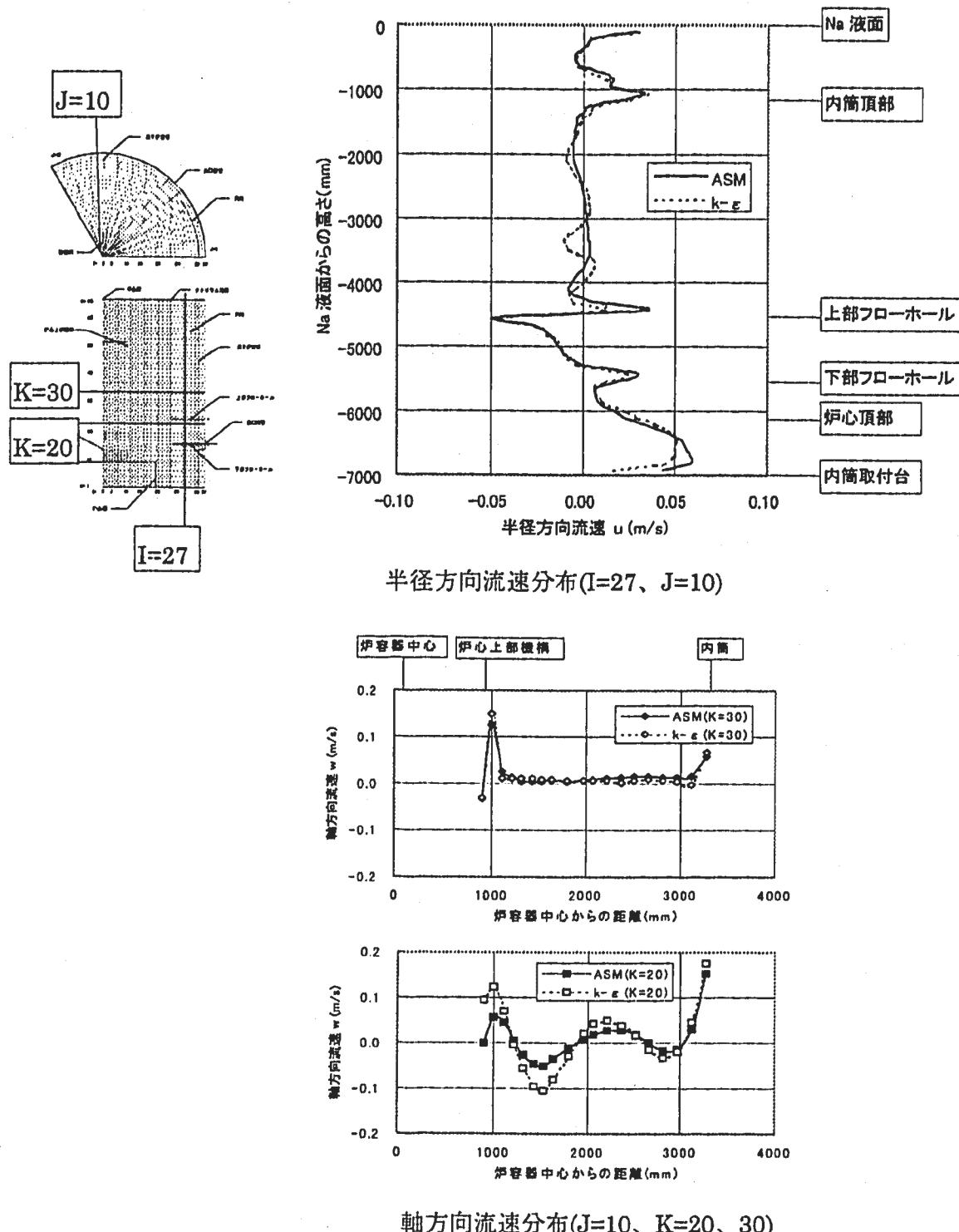
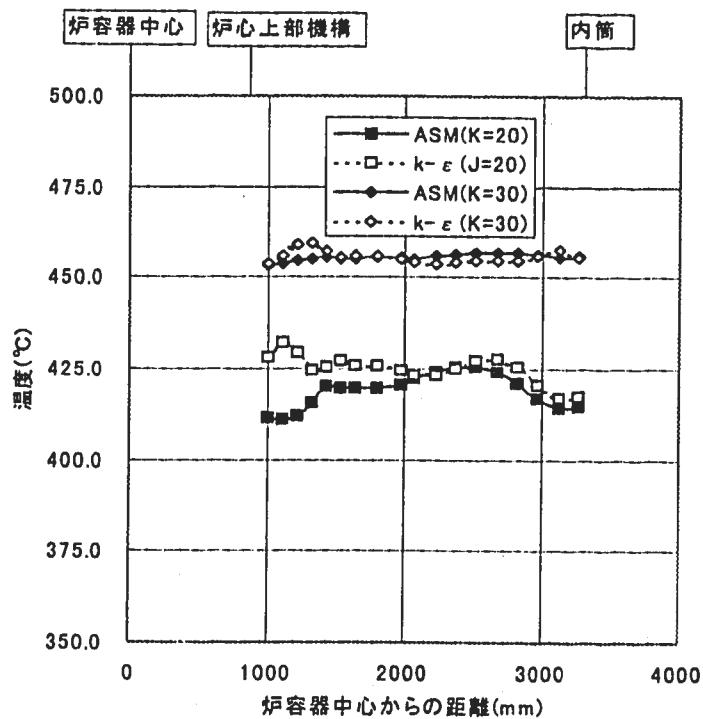
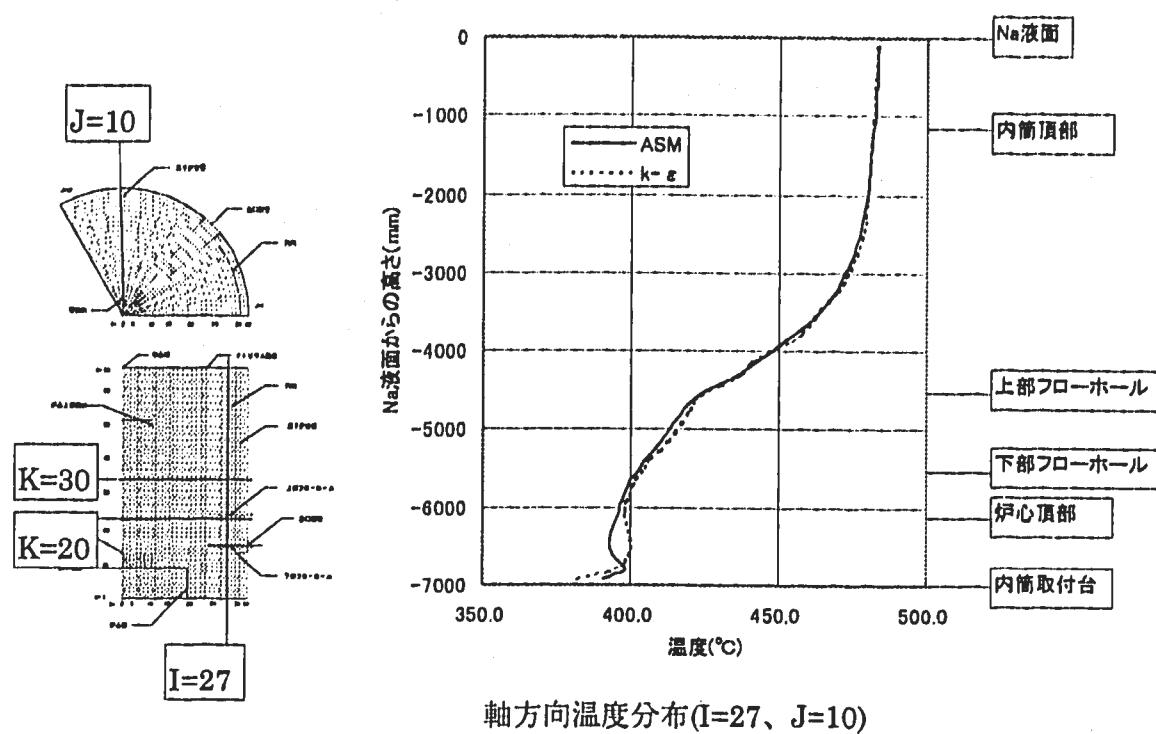


図 3.12 原子炉スクラムから 300 秒後の半径方向流速分布と軸方向流速分布



半径方向温度分布(J=10、K=20、30)

図 3.13 原子炉スクラムから 180 秒後の半径方向温度分布と軸方向温度分布

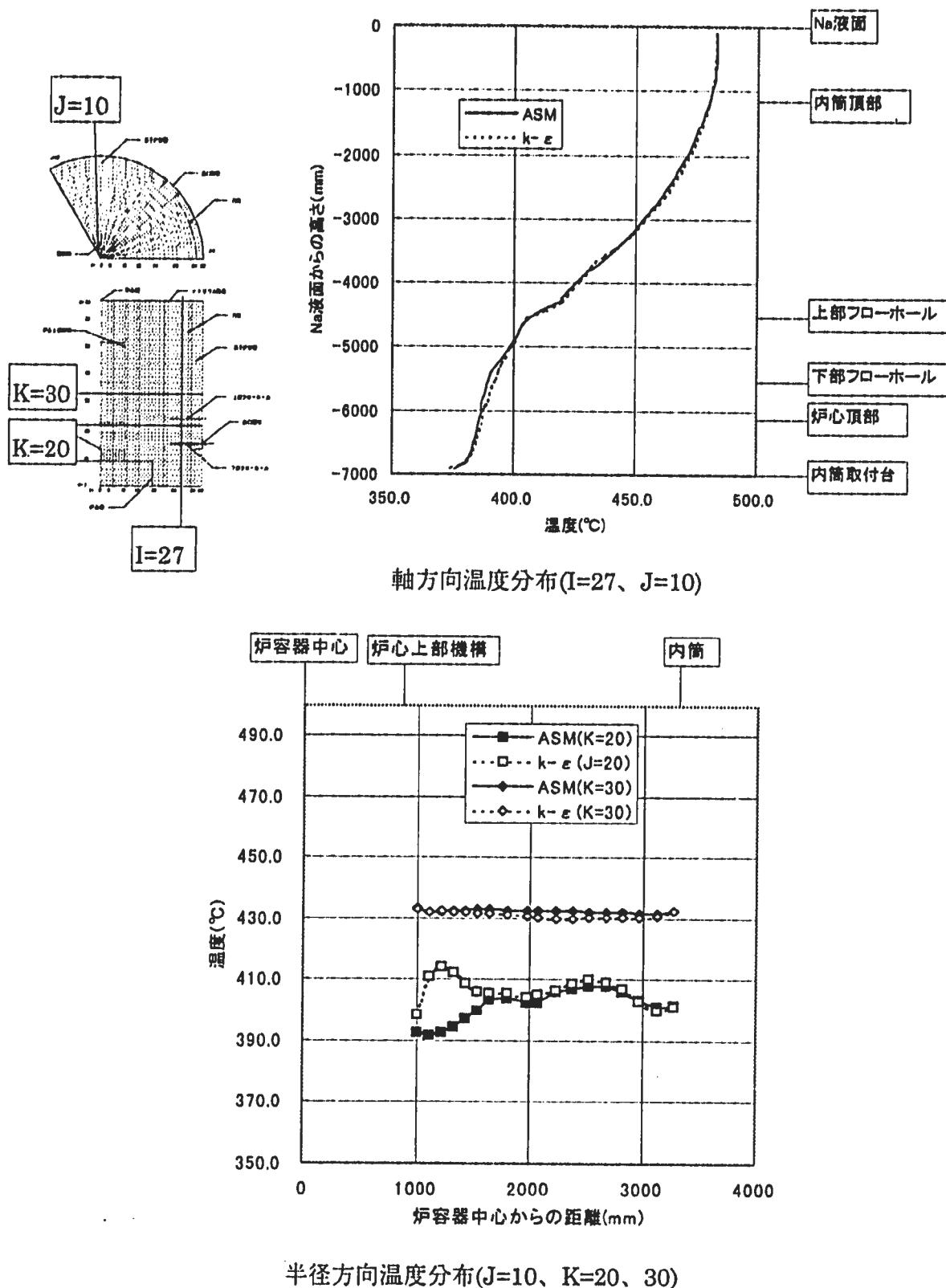


図 3.14 原子炉スクラムから 300 秒後の半径方向温度分布と軸方向温度分布

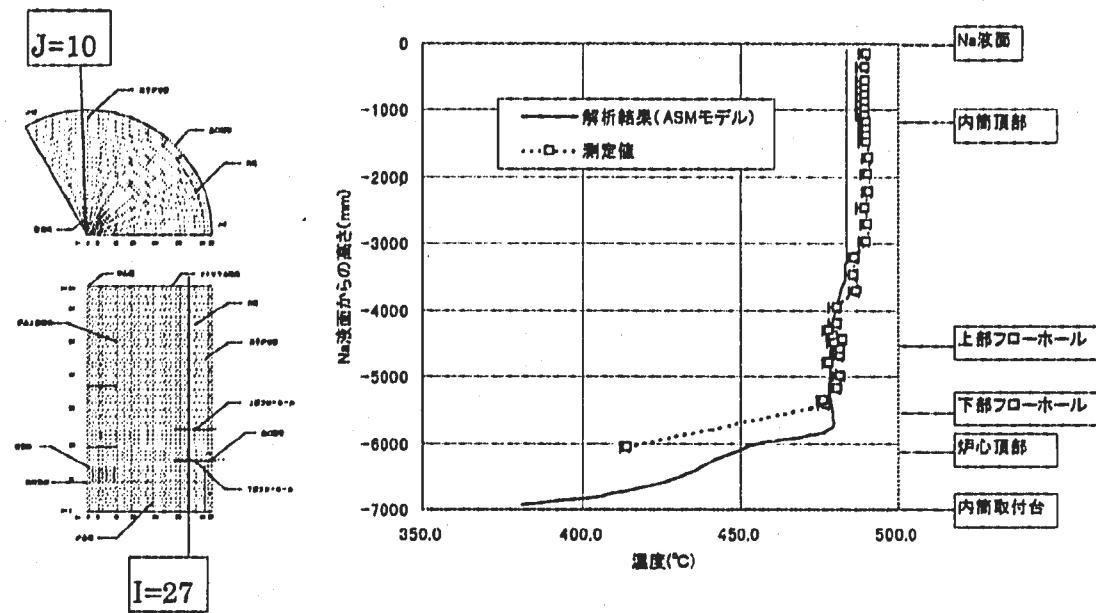


図 4.1 定常時の測定結果と解析結果の軸方向温度分布

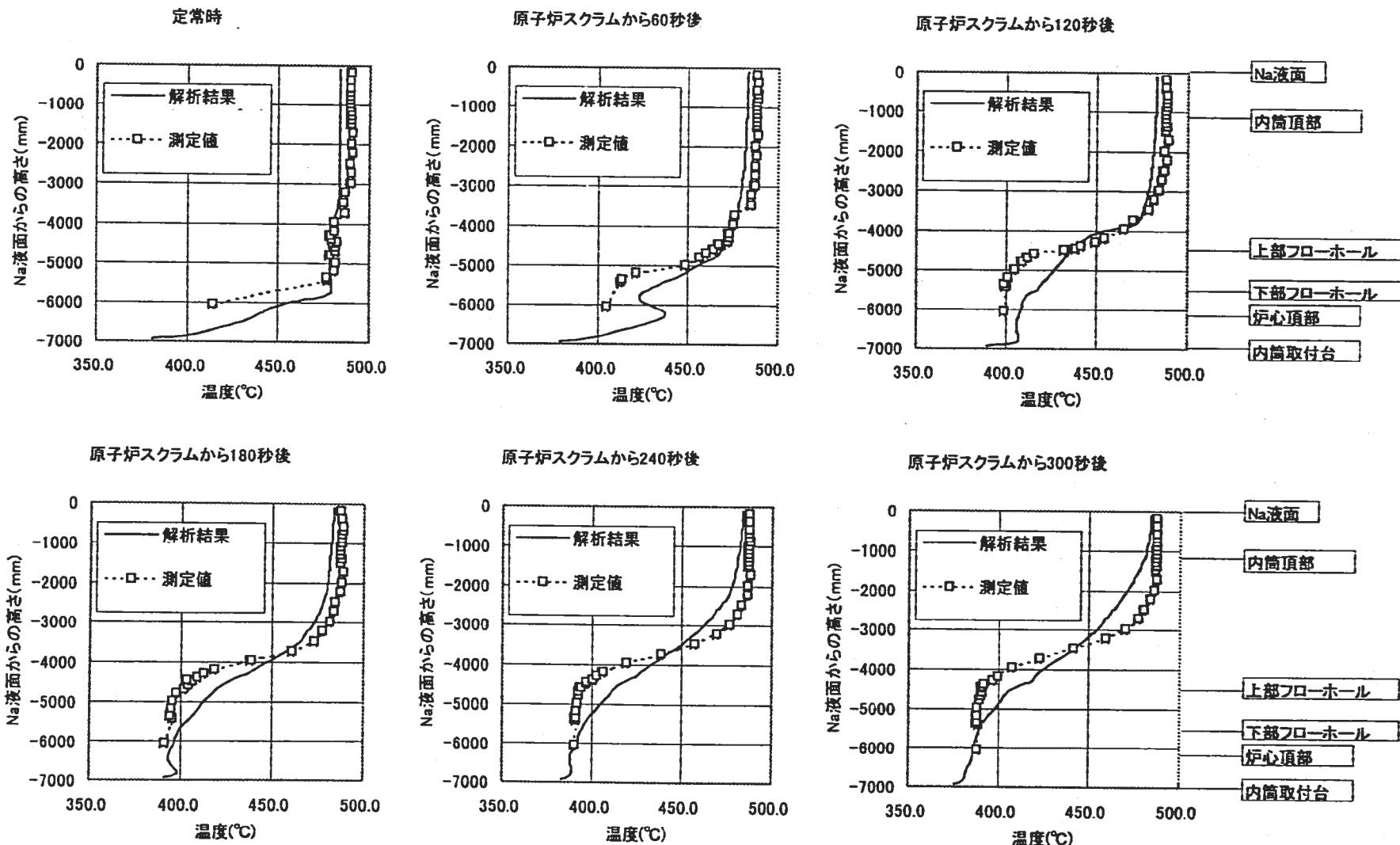


図 4.2 過渡時の測定結果と解析結果の軸方向温度分布 (I=27、J=10)

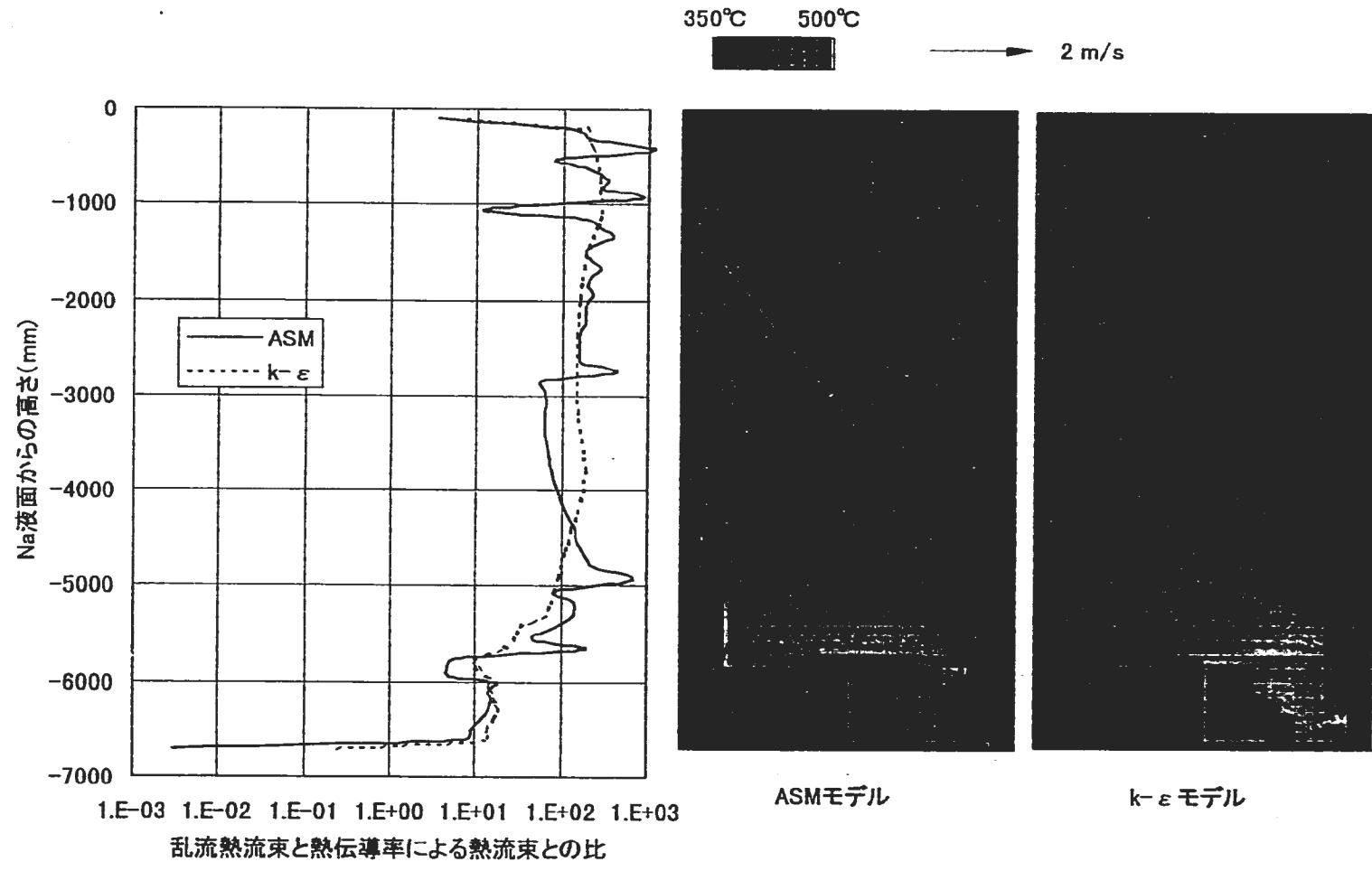


図 5.1 定常時の軸方向乱流熱流束分布と流況

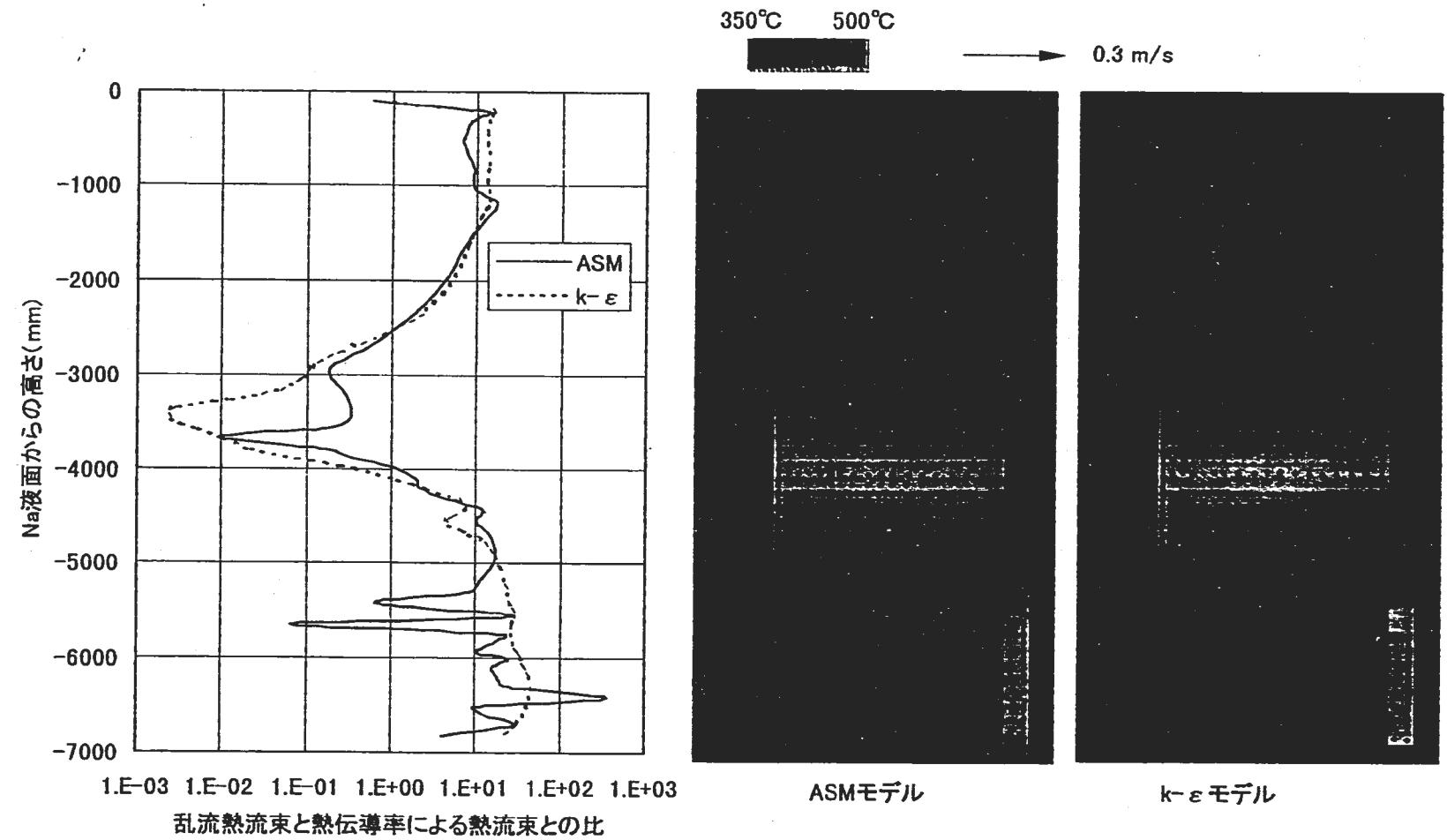


図 5.2 原子炉スクラムから 180 秒後の軸方向乱流熱流束分布と流況

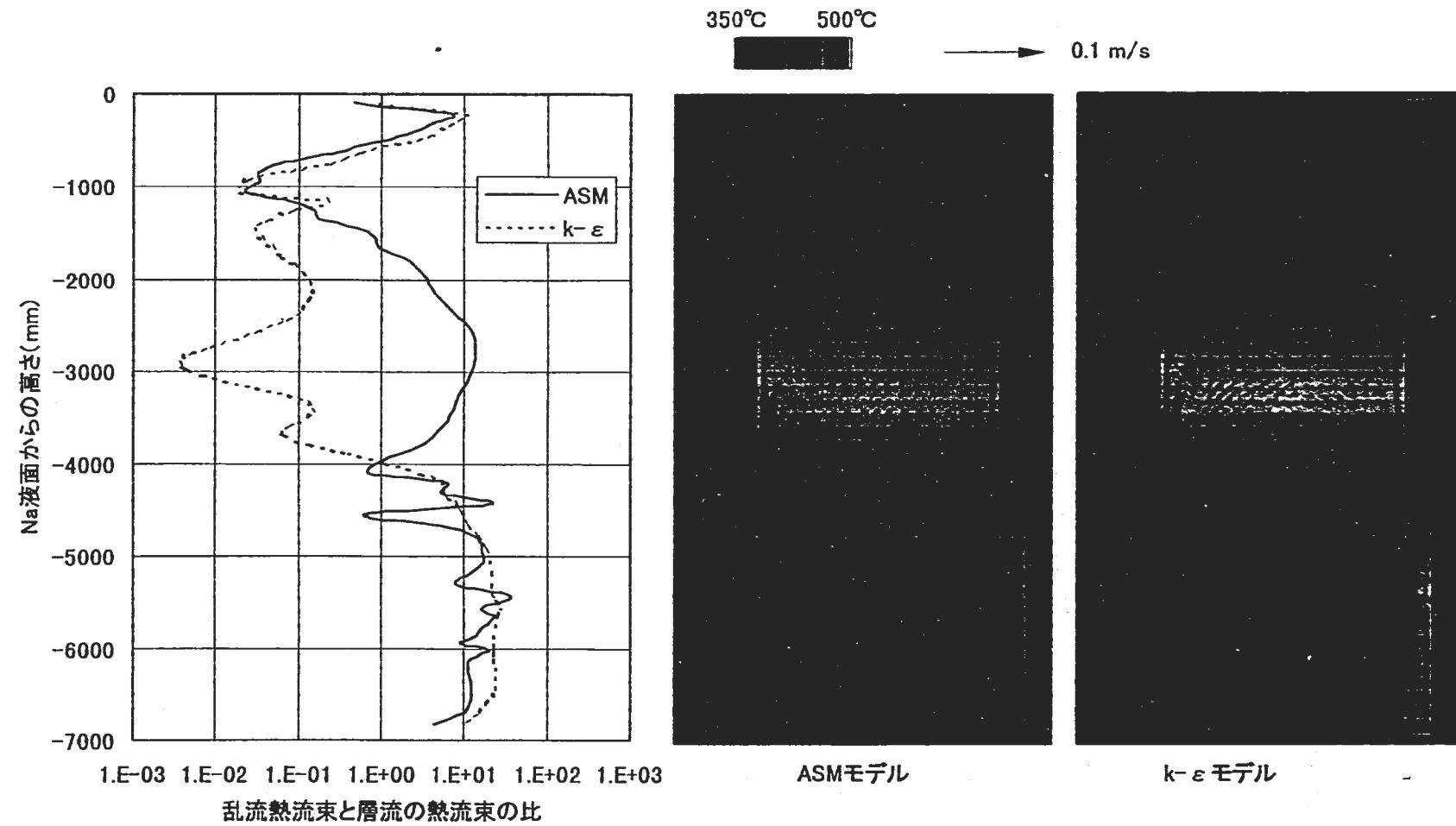


図 5.3 原子炉スクラムから 300 秒後の軸方向乱流熱流束分布と流況

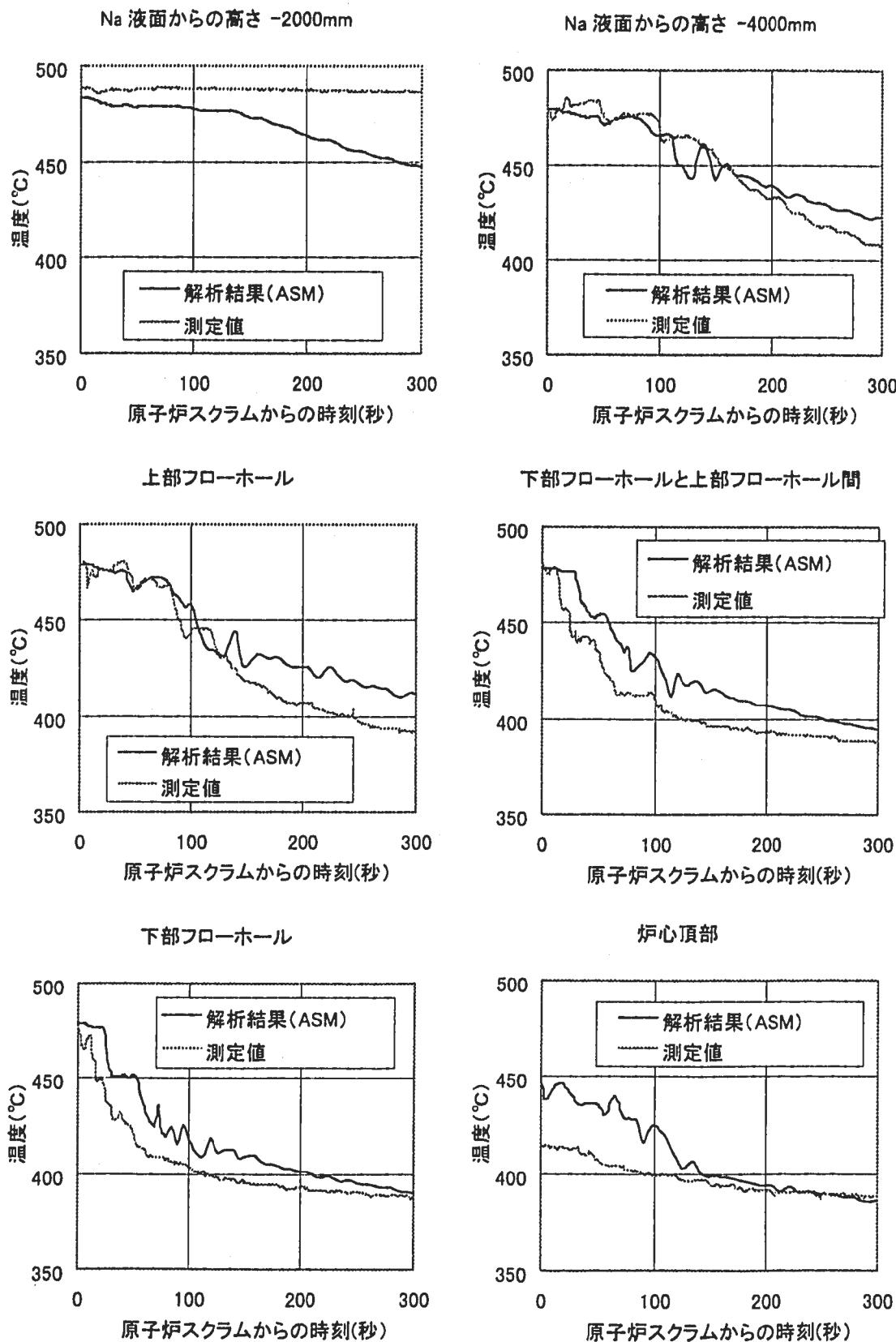


図 5.4 軸方向各位置の温度の時間変化