

JAERI - M

88-147

高温ガス炉炉心内冷却材混合特性
(プレナムブロック内7噴流混合実験の結果)

1988年8月

功 刀 資 彰

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

高温ガス炉炉心内冷却材混合特性
(プレナムブロック内7噴流混合実験の結果)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

功刀 資彰

(1988年7月15日受理)

本報告は、高温ガス炉（高温工学試験研究炉：HTTR）の各炉心領域下部のプレナムブロック空洞内における冷却材混合特性を実験的に検討したものである。これまでの設計で提案された主なプレナムブロックの形状を模擬した3個の試験モデルを用いた7噴流混合実験の結果、混合特性は空洞水平断面内の温度差と流量比の関数で評価できることが分かった。このことから、現在の設計で採用されているプレナムブロック形状においても十分な冷却材混合が得られる見通しを得た。

Thermal Mixing of Coolant Flows in a High Temperature
Gas-Cooled Reactor
(Seven-Jet Mixing Experiments in a Plenum Block)

Tomoaki KUNUGI

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 15, 1988)

This paper describes the experimental results concerned with the characteristics of the thermal mixing in the plenum block of the high temperature gas-cooled reactor. In consequence of the seven-jet mixing experiments using three scale models simulating the plenum block, it is found that the characteristics of the thermal mixing in the plenum block can be evaluated by the functions of temperature differences in the horizontal cross-section and ratios of flow rates. Moreover, it is found that the sufficient thermal mixing in the present design of the plenum block can be obtained.

Keywords: High Temperature Gas-cooled Reactor, Thermal Mixing Characteristics, Seven-jet Experiment, Temperature Distribution, Plenum Block, Scale Model, Nozzle Angle, Nozzle Diameter, Ratio of Mass Flow Rates

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置および実験方法	1
3. 等流量配分条件における実験結果	3
3.1 断面内温度分布	3
3.1.1 交差角 $\theta = 38.7^\circ$ モデル (詳細設計(I)の形状)での結果	3
3.1.2 交差角 $\theta = 60^\circ$ モデルでの結果	3
3.1.3 交差角 $\theta = 90^\circ$ モデル (現設計の形状)での結果	4
3.2 混合特性	4
3.2.1 交差角 $\theta = 38.7^\circ$ モデルでの断面内最大温度差の減衰	4
3.2.2 交差角 $\theta = 60^\circ$ モデルでの断面内最大温度差の減衰	5
3.2.3 交差角 $\theta = 90^\circ$ モデルでの断面内最大温度差の減衰	5
4. 不均等流量配分条件における実験結果	6
4.1 断面内温度分布 (交差角 $\theta = 90^\circ$ モデル)	6
4.2 混合特性	6
5. まとめ	7
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Apparatus and Measuring Procedures	1
3. Experimental Results in Equi-distribution Conditions	3
3.1 Temperature Distributions in Horizontal and Vertical Cross-sections	3
3.1.1 Results with a $\theta=38.7^\circ$ Model (Detailed Design I)	3
3.1.2 Results with a $\theta=60^\circ$ Model	3
3.1.3 Results with a $\theta=90^\circ$ Model (Present Design)	4
3.2 Characteristics of Thermal Mixing	4
3.2.1 Decay of the Maximum Temperature Differences in Horizontal Cross-section for $\theta=38.7^\circ$ Model	4
3.2.2 Decay of the Maximum Temperature Differences in Horizontal Cross-section for $\theta=60^\circ$ Model	5
3.2.3 Decay of the Maximum Temperature Differences in Horizontal Cross-section for $\theta=90^\circ$ Model	5
4. Experimental Results in Mal-distribution Conditions	6
4.1 Temperature Distributions in Horizontal Cross-section	6
4.2 Characteristics of Thermal Mixing	6
5. Conclusion	7
Acknowledgement	7
References	7

1. はじめに

現在、日本原子力研究所ではヘリウムガスを冷却材とした高温ガス炉（高温工学試験研究炉：HTTR）の開発が進められている。炉心部を通過した冷却材は各炉心領域下部のプレナムブロック空洞内に集められ、空洞内の熱電対で各炉心領域の出口混合ガス温度を監視する構造となっている（Fig. 1 参照）。冷却材は、プレナムブロック空洞内に温度の異なる複数の噴流（400℃～1000℃）として流入する。ガス温度の正確な計測と高温プレナム部に接続する出口管へのホットストリークによる熱衝撃を防止するためにはプレナムブロックで冷却材を十分に混合させる必要がある。これまでに、プレナムブロック内に噴出する2噴流の混合特性については実験的に検討し、混合を促進させるプレナムブロックの形状等を明らかにした。¹⁾ 本報では、これまでの設計で提案された主なプレナムブロックの形状²⁾における冷却材7噴流の混合特性について実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。実験装置はアクリル製試験部、加熱部、加熱器および空気供給系から構成されており、各部は塩化ビニール製配管で結ばれている。計測制御系は、試験部で用いる可動式熱電対レイクおよび多点温度記録計、加熱器電圧調整用スライダック、浮き子式空気流量計等から構成されている。

試験部はプレナムブロック空洞を模擬した内径176mmのアクリル製円筒状（Fig. 1）をしており、円筒上端のフランジに7本の冷却材流入路を取り付けた。中央のノズルは制御棒カラムからの低温の冷却材流入路、円筒の周方向等に等間隔で配置された6本の側部ノズルは燃料カラムからの高温の冷却材流入路を模擬している。以下、中央ノズルに関する量には添字c、側部ノズルに関する量には添字sまたは s_i ($i = 1 \sim 6$) を付けて示す。したがって、中央ノズルの形状・熱流動条件は、管径 d_c 、温度 t_c （室温+約20℃）、流量 Q_c であり、側部ノズルの形状・熱流動条件は管径 d_s 、温度 $t_{s_1 \sim s_6}$ （=室温）、流量 $Q_{s_1} \sim Q_{s_6}$ である。また θ はノズル交差角を表す。

ブロウから吸入された大気圧・室温の空気は、流量計で所定の流量に調整された後、試験部へ供給される。実炉では中央ノズルが低温側、側部ノズルが高温側であるが、6系統の空気を加熱して均一な温度を得ることは難しいので、本実験では中央ノズルの空気流のみを加熱し、温度分布を求める際に後述するような方法で逆変換した。予備実験の結果、空気を吸入する際の実験室内の空間的・時間的な温度変化が本実験の温度差に比べて無視できないことが分かったので、断熱施工した一つの空気予混合室を各流路共通の供給空気源として空気温度の均一化を図った。これによって、6本の側部流路のノズル出口での空気温度の差が最大0.2℃以内の範囲で実験することができた。また、予備実験の結果、試験部外への熱損失が約10%程度あることが分かったの

1. はじめに

現在、日本原子力研究所ではヘリウムガスを冷却材とした高温ガス炉（高温工学試験研究炉：HTTR）の開発が進められている。炉心部を通過した冷却材は各炉心領域下部のプレナムブロック空洞内に集められ、空洞内の熱電対で各炉心領域の出口混合ガス温度を監視する構造となっている（Fig. 1 参照）。冷却材は、プレナムブロック空洞内に温度の異なる複数の噴流（400℃～1000℃）として流入する。ガス温度の正確な計測と高温プレナム部に接続する出口管へのホットストリークによる熱衝撃を防止するためにはプレナムブロックで冷却材を十分に混合させる必要がある。これまでに、プレナムブロック内に噴出する2噴流の混合特性については実験的に検討し、混合を促進させるプレナムブロックの形状等を明らかにした。¹⁾ 本報では、これまでの設計で提案された主なプレナムブロックの形状²⁾における冷却材7噴流の混合特性について実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略をFig. 2に示す。実験装置はアクリル製試験部、加熱部、加熱器および空気供給系から構成されており、各部は塩化ビニール製配管で結ばれている。計測制御系は、試験部で用いる可動式熱電対レイクおよび多点温度記録計、加熱器電圧調整用スライダック、浮き子式空気流量計等から構成されている。

試験部はプレナムブロック空洞を模擬した内径176mmのアクリル製円筒状（Fig. 1）をしており、円筒上端のフランジに7本の冷却材流入路を取り付けた。中央のノズルは制御棒カラムからの低温の冷却材流入路、円筒の周方向等に等間隔で配置された6本の側部ノズルは燃料カラムからの高温の冷却材流入路を模擬している。以下、中央ノズルに関する量には添字c、側部ノズルに関する量には添字sまたは s_i ($i = 1 \sim 6$)を付けて示す。したがって、中央ノズルの形状・熱流動条件は、管径 d_c 、温度 t_c （室温+約20℃）、流量 Q_c であり、側部ノズルの形状・熱流動条件は管径 d_s 、温度 $t_{s1 \sim s6}$ （=室温）、流量 $Q_{s1} \sim Q_{s6}$ である。また θ はノズル交差角を表す。

ブロウから吸入された大気圧・室温の空気は、流量計で所定の流量に調整された後、試験部へ供給される。実炉では中央ノズルが低温側、側部ノズルが高温側であるが、6系統の空気を加熱して均一な温度を得ることは難しいので、本実験では中央ノズルの空気流のみを加熱し、温度分布を求める際に後述するような方法で逆変換した。予備実験の結果、空気を吸入する際の実験室内の空間的・時間的な温度変化が本実験の温度差に比べて無視できないことが分かったので、断熱施工した一つの空気予混合室を各流路共通の供給空気源として空気温度の均一化を図った。これによって、6本の側部流路のノズル出口での空気温度の差が最大0.2℃以内の範囲で実験することができた。また、予備実験の結果、試験部外への熱損失が約10%程度あることが分かったの

で、外表面に綿状断熱材を施工して放熱を防止した。

試験体であるモデルの形状はノズル交差角 θ とノズル径比 $d_R (= d_s/d_c)$ で特徴付けられ、以下の3種類とした。

- ① $\theta = 38.7^\circ$, $d_R = 1.84$ (詳細設計(I)の形状)
- ② $\theta = 60^\circ$, $d_R = 2.4$
- ③ $\theta = 90^\circ$, $d_R = 2.4$ (現設計の形状)

流動条件は側部ノズル1本当りの質量流量比 $W_R (\sum \rho_i Q_{si} / \rho_c Q_c) = 4 \sim 22.5$ とした。このうち最小流量条件は、ノズルからの噴流が乱流自由噴流としての性質 (乱流噴流の諸特性値や分布がノズル出口レイノルズ数に依存しない性質) を保持するための条件³⁾ すなわち、ノズル径基準のレイノルズ数が 1.7×10^4 以上となるように決めた。また、最大流量条件はブロワの性能から決まる。

また、7本のノズルの流量配分の条件としては中央ノズルの流量を基準として①等流量配分条件、②不均等流量配分条件の2条件を設定した。以下に各条件の概要を示す。

①等流量配分条件：各側部ノズルの流量を全て同一とし、中央ノズルの流量に対して側部ノズル一本当りの流量の比を質量流量比 W_R で表して、 $W_R = 4 \sim 22.5$ とした。

②不均等流量配分条件：特定の側部ノズルの流量を調節して、不均等流量配分条件を設定した。流量を調節する側部ノズルが1本、2本、3本とした場合について、流量比範囲を $W_R = 1 \sim 4$ として実験した。詳細はTable 1を参照のこと。

空洞内温度分布は、Fig. 3に示すように熱電対レイク (銅・コンスタンタン熱電対11本を直径方向に楕形に配置したもの) を水平断面内で周方向 (ψ) へ 15° ずつ回転させて測定した。図中の●印が同時に計測可能な11点の熱電対レイクを示しており、○印が一水平断面での全計測点を示している。径方向を i 、周方向を j とすれば測定点の温度は $t_{i,j}$ で表される。1条件当たりの計測点数は、726点 (1断面当たり121点で管軸方向に6水平断面で測定) であった。

本実験の対象は乱流温度混合現象であるため、温度値は時間的に絶えず変動している。したがって、各地点の温度には約10秒間サンプリングした平均値を採用した。

測定点の温度 $t_{i,j}$ は空洞内へ流入する噴流のノズル出口温度差 $\Delta t (= t_c - t_s)$ を用いて次式で定義する無次元温度 T へ変換した。

$$T_{i,j} = 1 - (t_{i,j} - t_s) / \Delta t \quad \dots \dots \dots (1)$$

上式の定義は、前述したように実際のプレナムブロックの温度条件を模擬する場合、6本の側部噴流を均等に加熱するよりも中央噴流のみを加熱した方が制御し易いという実験上の理由を反映したものである。

また、空間内の温度分布は断面内の温度差が小さくなるに従って不明瞭になるため、各断面における無次元最大温度差 $\Delta T (= T_{\max} - T_{\min})$ を用いた無次元温度 T^* を次式で定義して空洞断面内の空間的溫度分布を拡大・視覚化した*。

) 垂直断面内に示した温度は上式の T^ 値であるが、水平断面中の等温線の値は元の温度 T で表示している。

$$T_{i,j}^* = (T_{i,j} - T_{\min}) / \Delta T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T_{\max} は断面内の最高温度、 T_{\min} は断面内の最低温度を意味している。

3. 等流量配分条件における実験結果

3.1 断面内温度分布

Fig. 4 ~ Fig. 30に3つの試験モデルで得られた各流量比におけるモデル空洞内の水平および垂直断面における温度分布を示す。

3.1.1 交差角 $\theta = 38.7^\circ$ モデル (詳細設計(I)の形状)での結果

Fig. 4 ~ Fig. 9は詳細設計(1)の形状を模擬したモデル ($\theta = 38.7^\circ$)で測定した水平断面内の温度分布を示しており、それぞれ流量比 $W_R = 8, 9, 12, 18, 19.7, 22.5$ の場合に対応している。各図において(a)~(e)は図右肩に示す軸方向位置 ($L/D = 0.68, 0.97, 1.53, 2.10, 2.67$) に対応した水平断面内の温度分布を示しており、温度分布が同心円状であることが分かる。Fig. 10はFig. 4 ~ Fig. 9の $\psi = 0^\circ - 180^\circ$ 方向の垂直断面内の温度分布を示したものである。流量比 W_R が増加するに従って中央ノズルからの低温の領域 (噴流ポテンシャルコアに対応する領域と考えられる) が次第に減少し、空洞内の温度差 (図右下の T_{\max} と T_{\min} の差) も減少していること、すなわち混合が進んでいる様子が分かる。

3.1.2 交差角 $\theta = 60^\circ$ モデルでの結果

Fig. 11 ~ Fig. 19は $\theta = 60^\circ$ のモデルで測定した水平断面内の温度分布を示しており、それぞれ流量比 $W_R = 4, 6, 8, 9, 12, 18, 22.5$ の場合に対応している (但し、Figs. 12, 13とFigs. 16, 17は流量比が同一でも総流量が異なる場合の結果を示している)。各図において(a)~(e)は図右肩に示す軸方向位置 ($L/D = 0.97, 1.25, 1.82, 2.39, 2.95$) に対応した水平断面内の温度分布を示しており、この場合も温度分布が同心円状であることが分かる。またFigs. 12, 13とFigs. 16, 17の結果から分かるように総流量が異なっても流量比が同じ場合の温度分布は非常に良い一致を示している。この傾向は $\theta = 38.7^\circ$ のモデルの実験でも確かめられており、本系での流れ場がノズル出口レイノルズ数に依存せずに相似性を保っていることが分かる。

Fig. 20はFig. 11 ~ Fig. 19の $\psi = 0^\circ - 180^\circ$ 方向の垂直断面内の温度分布を示したものである。流量比 W_R が増加するに従って中央ノズルからの低温の領域が次第に減少し、空洞内の温度差も減少しているが $\theta = 38.7^\circ$ のモデルに比べて温度差の減少度合いは小さい。また $W_R = 6$ の場合に独特な温度分布を示しており、この流量比領域での噴流衝突のメカニズムは他の場合と異なっているものと想像される。

2 噴流混合実験の結果¹⁾ (すなわち、ノズル交差角やノズル径比が大きい形状の方より混合が促

$$T_{i,j}^* = (T_{i,j} - T_{\min}) / \Delta T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T_{\max} は断面内の最高温度、 T_{\min} は断面内の最低温度を意味している。

3. 等流量配分条件における実験結果

3.1 断面内温度分布

Fig. 4 ~ Fig. 30に3つの試験モデルで得られた各流量比におけるモデル空洞内の水平および垂直断面における温度分布を示す。

3.1.1 交差角 $\theta = 38.7^\circ$ モデル (詳細設計(I)の形状)での結果

Fig. 4 ~ Fig. 9は詳細設計(1)の形状を模擬したモデル ($\theta = 38.7^\circ$)で測定した水平断面内の温度分布を示しており、それぞれ流量比 $W_R = 8, 9, 12, 18, 19.7, 22.5$ の場合に対応している。各図において(a)~(e)は図右肩に示す軸方向位置 ($L/D = 0.68, 0.97, 1.53, 2.10, 2.67$) に対応した水平断面内の温度分布を示しており、温度分布が同心円状であることが分かる。Fig. 10はFig. 4 ~ Fig. 9の $\psi = 0^\circ - 180^\circ$ 方向の垂直断面内の温度分布を示したものである。流量比 W_R が増加するに従って中央ノズルからの低温の領域 (噴流ポテンシャルコアに対応する領域と考えられる) が次第に減少し、空洞内の温度差 (図右下の T_{\max} と T_{\min} の差) も減少していること、すなわち混合が進んでいる様子が分かる。

3.1.2 交差角 $\theta = 60^\circ$ モデルでの結果

Fig. 11 ~ Fig. 19は $\theta = 60^\circ$ のモデルで測定した水平断面内の温度分布を示しており、それぞれ流量比 $W_R = 4, 6, 8, 9, 12, 18, 22.5$ の場合に対応している (但し、Figs. 12, 13とFigs. 16, 17は流量比が同一でも総流量が異なる場合の結果を示している)。各図において(a)~(e)は図右肩に示す軸方向位置 ($L/D = 0.97, 1.25, 1.82, 2.39, 2.95$) に対応した水平断面内の温度分布を示しており、この場合も温度分布が同心円状であることが分かる。またFigs. 12, 13とFigs. 16, 17の結果から分かるように総流量が異なっても流量比が同じ場合の温度分布は非常に良い一致を示している。この傾向は $\theta = 38.7^\circ$ のモデルの実験でも確かめられており、本系での流れ場がノズル出口レイノルズ数に依存せずに相似性を保っていることが分かる。

Fig. 20はFig. 11 ~ Fig. 19の $\psi = 0^\circ - 180^\circ$ 方向の垂直断面内の温度分布を示したものである。流量比 W_R が増加するに従って中央ノズルからの低温の領域が次第に減少し、空洞内の温度差も減少しているが $\theta = 38.7^\circ$ のモデルに比べて温度差の減少度合いは小さい。また $W_R = 6$ の場合に独特な温度分布を示しており、この流量比領域での噴流衝突のメカニズムは他の場合と異なっているものと想像される。

2 噴流混合実験の結果¹⁾ (すなわち、ノズル交差角やノズル径比が大きい形状の方より混合が促

進される)を基に考えた場合、 $\theta = 38.7^\circ$ のモデルの場合よりも $\theta = 60^\circ$ のモデルの方が角度 θ が大きくしかもノズル径比が大きいので混合がより促進されるものと予想されたが、実際には全く逆の結果が得られた。この原因を解明するためには噴流衝突の際の運動量交換のメカニズムを流れの可視化や3次元の熱流動数値解析コード⁴⁾等によって設細に検討する必要があると考えられる。

3.1.3 交差角 $\theta = 90^\circ$ モデル(現設計の形状)での結果

Fig. 21~Fig. 29は現在の設計で定められているプレナムブロック形状を模擬したモデル($\theta = 90^\circ$)で測定した水平断面内の温度分布を示しており、それぞれ流量比 $W_R = 4, 6, 8, 9, 12, 18, 22.5$ の場合に対応している(但し、Figs. 22, 23とFigs. 26, 27は流量比が同一でも総流量が異なる場合の結果を示している)。各図において(a)~(f)は図右肩に示す軸方向位置($L/D = 0.28, 0.57, 0.85, 1.14, 1.90, 2.76$)に対応した水平断面内の温度分布を示しており、この場合も温度分布は同心円状であることが分かる。またFigs. 22, 23とFigs. 26, 27から分かるように総流量が異なっても流量比が同じ場合の温度分布は非常に良い一致を示し、 $\theta = 38.7^\circ$ のモデル及び 60° のモデルの場合と同様な結果を得た。

Fig. 30はFig. 21~Fig. 29の $\psi = 0^\circ - 180^\circ$ 方向の垂直断面内の温度分布を示したものである。流量比 W_R が増加するに従って中央ノズルからの低温の領域が次第に減少し、空洞内の温度差も減少しており、 $\theta = 38.7^\circ$ の詳細設計(I)のモデルで得られた結果と同様な傾向を示した。

3.2 混合特性

前述のように、7噴流が衝突・合流する非常に複雑な流れ場であるにもかかわらず、試験モデル内の温度分布は単純な同心円状を示した。2噴流の混合実験では温度分布が空間的に局在化していたので、温度分布の空間的偏りを標準偏差で表して混合特性の指標¹⁾と考えた。しかし、本実験では温度分布が同心円であり、混合特性を温度分布の偏りから評価することはできない。したがって、モデルの水平断面内の温度差の下流方向への減衰を調べることによってモデル内の混合特性を評価した。

3.2.1 交差角 $\theta = 38.7^\circ$ モデルでの断面内最大温度差の減衰

Fig. 31(a)~(d)は各流量比 W_R における水平断面内の最大温度差 ΔT の下流方向(L/D)への減衰を示したものである。図中の●印が実験値であり、 ΔT の下流方向への変化は図中の実線で近似される直線的な変化を示している。この関係は次式で表され、最大温度差 ΔT の下流方向への減衰特性を示している。

$$\Delta T = a (L / D)^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式で n は水平断面内の最大温度差の下流方向への減衰率を表しており、係数 a がその流量比条件における混合の指標と考えられる。

各流量比条件の結果が上式で良く近似できたので、減衰率 n と係数 a の流量比 W_R に対する依存

性を調べた。Fig. 32は減衰率 n の流量比 W_R に対する依存性を、Fig. 33は係数 a の流量比 W_R に対する依存性を示している。減衰率 n は流量比 W_R が増加するに従って減少する傾向を示し、本モデルでは流量比 W_R が増加すると混合性能が低下することが分かる。一方、係数 a は流量比 W_R の増加に従って直線的に減少することが分かる。係数 $a = 0$ の完全混合時の流量比 W_R を求めると $W_R = 26$ であることが分かった。

3.2.2 交差角 $\theta = 60^\circ$ モデルでの断面内最大温度差の減衰

Fig. 34 (a)~(g)は各流量比 W_R における水平断面内最大温度差 ΔT の下流方向(L/D)への減衰を示したものである。図中の●印が実験値であり、 ΔT の下流方向への変化は $\theta = 38.7^\circ$ モデルの場合とほぼ同様であるが、全体的に温度差が大きく混合が十分に行われないうちに試験部から流出していることが分かる。Fig. 35に減衰率 n の流量比 W_R に対する変化を示す。下流ほど減衰率が大きくなっており混合が進む傾向を示しているが、上述の結果を考え合わせると本試験部内での混合は不十分であることが分かる。係数 a については後述の $\theta = 90^\circ$ の結果と合せてFig. 40に示した。この結果でも本モデルの混合性能が際立って悪いことが分かる。

3.2.3 交差角 $\theta = 90^\circ$ モデルでの断面内最大温度差の減衰

Fig. 36 (a)~(g)は各流量比 W_R における水平断面内の最高温度 T_{\max} と最低温度 T_{\min} の下流方向(L/D)への変化を示したものである。図中の○印が T_{\max} 、●印が T_{\min} の実験値であり、実線の T_{mix} は流量比 W_R から算出できる混合平均温度を表している。(b)と(e)には同一流量比 W_R で総流量の異なる場合の結果が示してあるが、総流量の違いが温度の下流方向変化に与える影響は小さいことが分かる。下流に進むに従って最高・最低温度が共に混合平均温度へ漸近して行く様子が分かる。また、流量比 W_R が大きくなるに従って最低温度 T_{\min} の混合平均温度への漸近がより上流側で始まる傾向を示している。

Fig. 37 (a)~(g)は各流量比 W_R における水平断面内温度差 ΔT の下流方向(L/D)への減衰を示したものである。図中の●印が実験値であり、 ΔT の下流方向への変化は $\theta = 38.7^\circ$ モデルの場合とほぼ同様である。実線の近似は噴流衝突の影響が小さくなると考えられる $L/D > 0.5$ の領域について行っており、各流量比 W_R において近似式と良い一致を示している。Fig. 38に減衰率 n の流量比 W_R に対する依存性を、Fig. 39に係数 a の流量比 W_R に対する依存性を示した。減衰率 n は流量比 W_R が増加するに従って増加する傾向を示し、本試験モデルでは流量比 W_R が増加すると混合性能が急激に向上することが分かる。係数 a は流量比 W_R の増加に従って直線的に減少しており、図中の実線を外挿して係数 $a = 0$ の完全混合時の流量比 W_R を求めると $W_R = 32$ であることが分かった。

Fig. 40は上記3つのモデルにおける係数 a と流量比 W_R の関係をまとめた図である。 $\theta = 60^\circ$ のモデルの混合性能が際立って悪いことと、 $\theta = 90^\circ$ モデルが実験したほとんどの W_R 範囲において混合性能が優れていることが分かった。現在のHTTRの設計形状は $\theta = 90^\circ$ モデルと相似であり流量比条件も $W_R = \text{約}60$ 程度であることから、プレナムブロック内で十分な混合が行われると考えられる。

4. 不均等流量配分条件における実験結果

前章では、側部ノズル6つの流量を同一とした等流量配分条件での実験結果について述べたが、本章では特定の側部ノズルの流量を変えた不均等流量配分条件における実験結果について述べる。6本の側部ノズルの内、異なる流量で噴出させる側部ノズルを1本、2本、3本と設定した場合について、Table 1の流量比範囲における混合特性を検討した。

4.1 断面内温度分布（交差角 $\theta = 90^\circ$ モデル）

Fig. 41~Fig. 49に $\theta = 90^\circ$ モデルにおけるTable 1のType (A-1)~(C-3)の9条件での温度分布を示す。

Fig. 41~43はType (A-1)~(A-3)の場合、すなわち側部ノズル1本のみの流量を変化させた場合であり、流量を絞ったノズル側へ温度分布が偏っていることが分かる。このノズルの流量を増加させると温度分布は等流量配分条件の場合と同様な同心円状の分布に近づくことが分かる。Fig. 44~46はType (B-1)~(B-3)の場合、すなわち側部ノズル2本の流量を変化させた場合であり、Type (A-1)~(A-3)の場合と同様に温度分布が流量を絞ったノズル側へ偏っていることが分かる。流量を増加させると同心円状に近づくことも同様である。Fig. 47~49はType (C-1)~(C-3)、すなわち側部ノズル3本の流量を変化させた場合であり、Type (A-1)~(A-3)の場合と同様に温度分布が流量を絞ったノズル側へ偏っていることが分かる。流量を増加させると同心円状に近づくことも同様である。

Type A, B, Cのいずれの場合も流量比の変化に対する温度分布のパターン変化は同様であったが、流量調節するノズルの本数が多くなるに従って温度分布の偏りも大きくなるようである。

4.2 混合特性

Fig. 50~52は $\theta = 90^\circ$ モデルで実験を行った場合の各Type (Table 1に示す)における水平断面内最大温度差 ΔT の下流方向 (L/D) への減衰を示したものである。図中の●印が実験値であり、図中の実線は等流量配分条件における減衰特性を示している。各Type 共に流量比が増加すると等流量配分条件における結果に漸近することが分かる。しかし、流量比が小さく不均一-の程度が大きい場合には、減衰の傾向自体が等流量配分条件における結果とは異なることが分かった。

以上の結果から、不均等流量配分条件における混合特性はノズル本数、配置および流量比条件に大きく依存すると考えられる。したがって、実炉でこのような不均等流量配分が予想される場合には、炉心内流量配分計画に合わせたノズル本数・配置・流量比条件で実験する必要があるだろう。

5. ま と め

高温ガス炉のプレナムブロックの縮尺モデルを用いた7噴流混合実験を行った結果、現設計の形状($\theta=90^\circ$)は、 $\theta=60^\circ$ モデルや従来の設計によるプレナムブロック形状($\theta=38.7^\circ$)に比べて等流量配分条件における W_R のほとんどの範囲に渡って混合特性が優れており、HTTRの定格運転条件(W_R = 約60)において十分な混合が得られることが分かった。

しかし、不均等流量配分となるプレナムブロック内での混合特性はノズル本数、配置および流量比条件に大きく依存するので、実炉の流量条件で混合特性を把握する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、ご助言とご指導を賜った佐野川好母動力炉開発・安全性研究管理部長、武藤康高温構造工学研究室長、河村洋東京理科大学教授および著者が本研究を遂行する際にご助力を頂いた高温工学部の瀧塚貴和主任研究員と蕪木英雄副主任研究員に記して感謝する。最後に、実験作業を効率的に進めて頂いた高温工学部の橋勝美主査と株原子力代行の清水正氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 刃刀資彰他，機論B，51巻465号，1688(1985)
- (2) 日本原子力研究所，多目的高温ガス炉の研究開発の現状(1980~1985)，
高温ガス炉研究開発の現状(1986)，高温工学試験研究の現状(1987)
- (3) 例えば，Davis, J. T., "Turbulence Phenomena", 69, Academic Press. (1972)
- (4) 刃刀資彰他，JAERI-M 88-119(1988)および井川博雅他，JAERI-M 86-093(1986)

5. ま と め

高温ガス炉のプレナムブロックの縮尺モデルを用いた7噴流混合実験を行った結果、現設計の形状($\theta=90^\circ$)は、 $\theta=60^\circ$ モデルや従来の設計によるプレナムブロック形状($\theta=38.7^\circ$)に比べて等流量配分条件における W_R のほとんどの範囲に渡って混合特性が優れており、HTTRの定格運転条件(W_R = 約60)において十分な混合が得られることが分かった。

しかし、不均等流量配分となるプレナムブロック内での混合特性はノズル本数、配置および流量比条件に大きく依存するので、実炉の流量条件で混合特性を把握する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、ご助言とご指導を賜った佐野川好母動力炉開発・安全性研究管理部長、武藤康高温構造工学研究室長、河村洋東京理科大学教授および著者が本研究を遂行する際にご助力を頂いた高温工学部の瀧塚貴和主任研究員と蕪木英雄副主任研究員に記して感謝する。最後に、実験作業を効率的に進めて頂いた高温工学部の橋勝美主査と(株)原子力代行の清水正氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 刃刀資彰他, 機論B, 51巻465号, 1688 (1985)
- (2) 日本原子力研究所, 多目的高温ガス炉の研究開発の現状 (1980~1985), 高温ガス炉研究開発の現状 (1986), 高温工学試験研究の現状 (1987)
- (3) 例えば, Davis, J. T., "Turbulence Phenomena", 69, Academic Press, (1972)
- (4) 刃刀資彰他, JAERI-M 88-119 (1988) および井川博雅他, JAERI-M 86-093 (1986)

5. ま と め

高温ガス炉のプレナムブロックの縮尺モデルを用いた7噴流混合実験を行った結果、現設計の形状 ($\theta = 90^\circ$) は、 $\theta = 60^\circ$ モデルや従来の設計によるプレナムブロック形状 ($\theta = 38.7^\circ$) に比べて等流量配分条件における W_R のほとんどの範囲に渡って混合特性が優れており、HTTR の定格運転条件 ($W_R = \text{約} 60$) において十分な混合が得られることが分かった。

しかし、不均等流量配分となるプレナムブロック内での混合特性はノズル本数、配置および流量比条件に大きく依存するので、実炉の流量条件で混合特性を把握する必要がある。

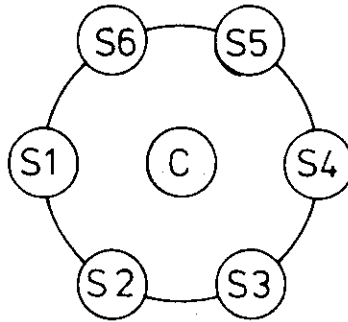
謝 辞

本研究を進めるに当たり、ご助言とご指導を賜った佐野川好母動力炉開発・安全性研究管理部長、武藤康高温構造工学研究室長、河村洋東京理科大学教授および著者が本研究を遂行する際にご助力を頂いた高温工学部の瀧塚貴和主任研究員と蕪木英雄副主任研究員に記して感謝する。最後に、実験作業を効率的に進めて頂いた高温工学部の橋勝美主査と株原子力代行の清水正氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 刃刀資彰他，機論B，51巻465号，1688（1985）
- (2) 日本原子力研究所，多目的高温ガス炉の研究開発の現状（1980～1985），
高温ガス炉研究開発の現状（1986），高温工学試験研究の現状（1987）
- (3) 例えば，Davis, J. T., "Turbulence Phenomena", 69, Academic Press. (1972)
- (4) 刃刀資彰他，JAERI-M 88-119（1988）および井川博雅他，JAERI-M 86-093（1986）

Table 1 Ratio of flow rates for mal-distribution conditions



C : Cold Gas
 S1~S6: Hot Gas

Type	Ratio of Flow Rates
A-1	C/S1/S2~S6=1/1/4
A-2	C/S1/S2~S6=1/2/4
A-3	C/S1/S2~S6=1/3/4
B-1	C/S1~S2/S3~S6=1/1/4
B-2	C/S1~S2/S3~S6=1/2/4
B-3	C/S1~S2/S3~S6=1/3/4
C-1	C/S1~S3/S4~S6=1/1/4
C-2	C/S1~S3/S4~S6=1/2/4
C-3	C/S1~S3/S4~S6=1/3/4

For Equi-distribution
C/S1~S6=1/1~4

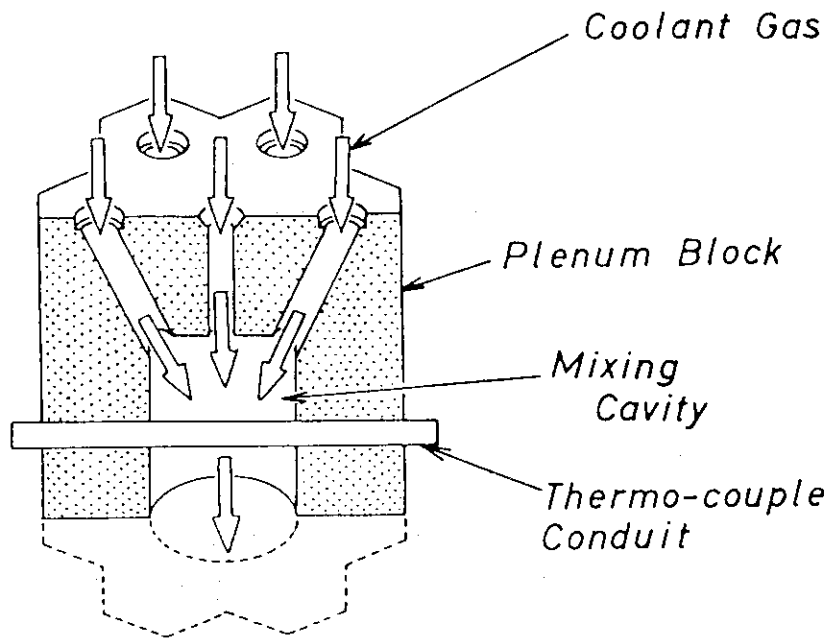


Fig. 1 Cutview of the plenum block in high temperature gas-cooled reactor

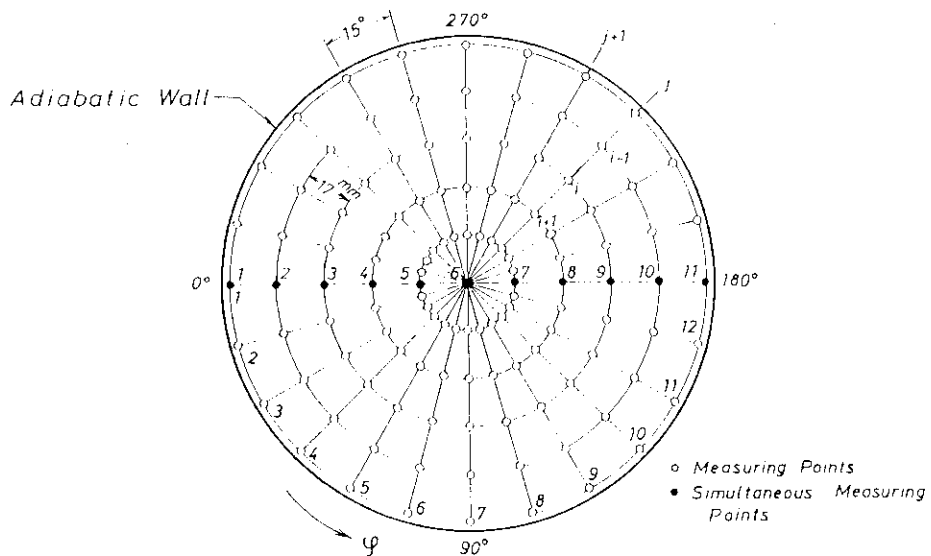


Fig. 3 Measuring points at the horizontal cross-section of the test model

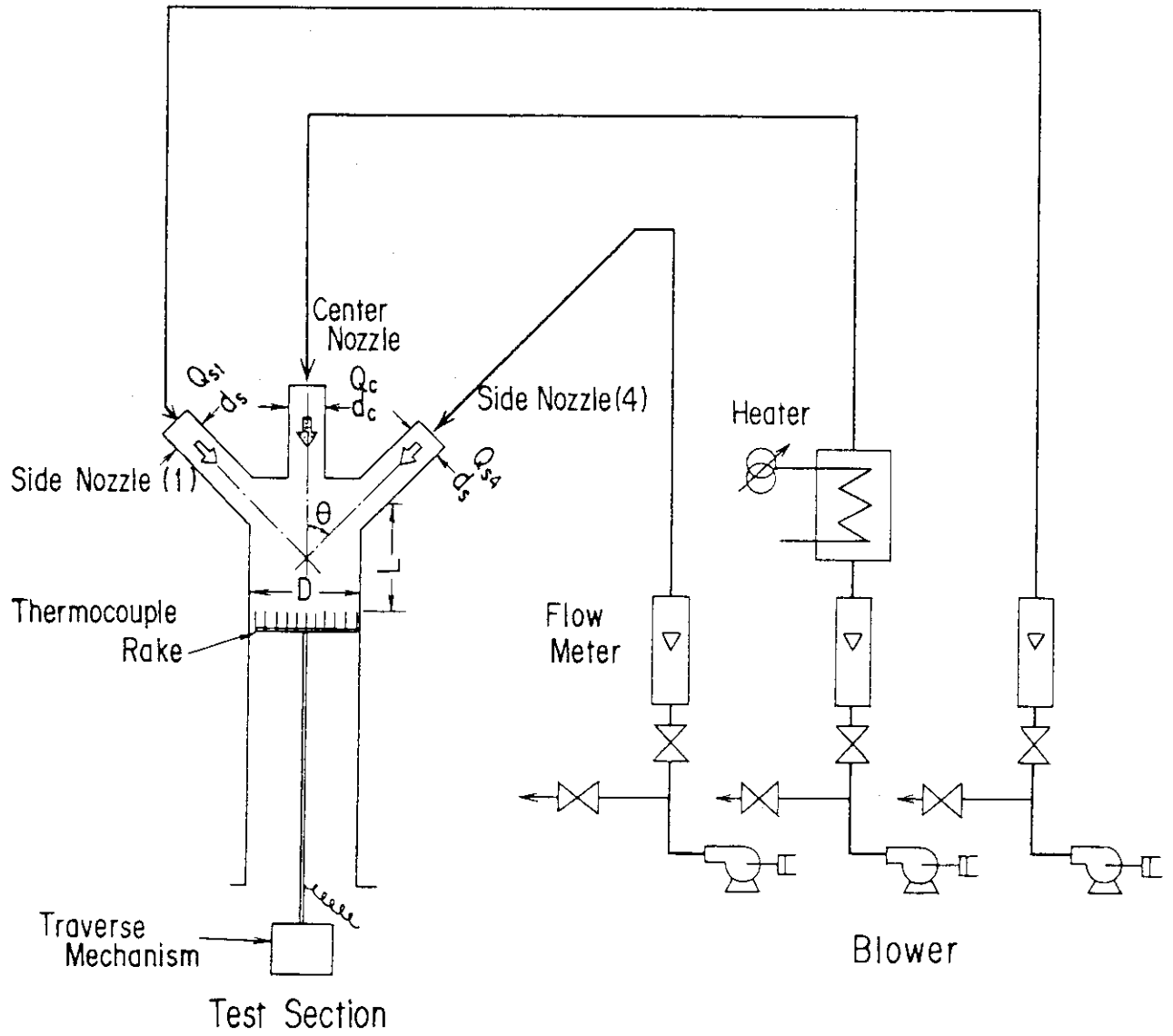


Fig. 2 Experimental apparatus

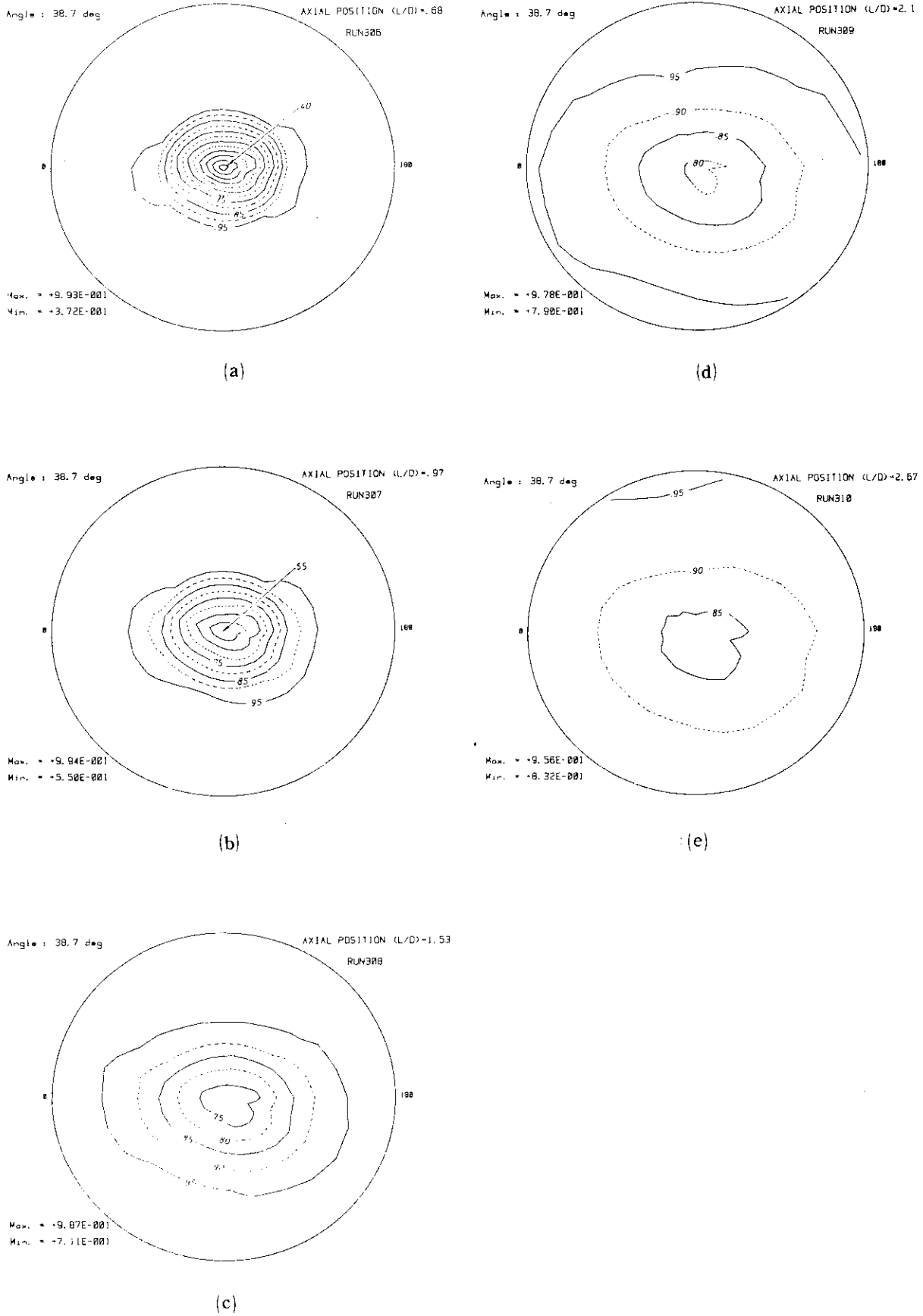


Fig. 4 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=8, 38.7^\circ$)

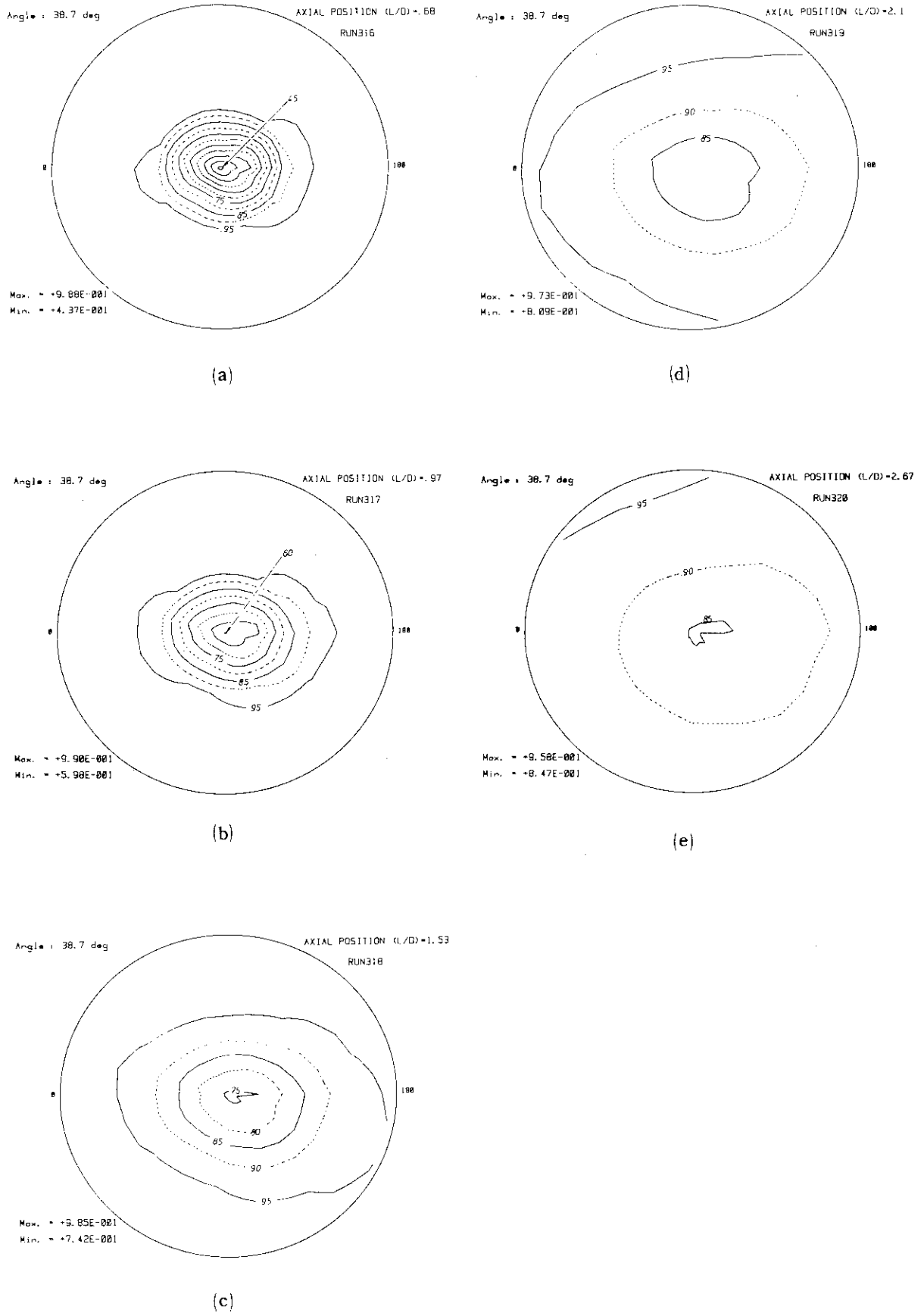
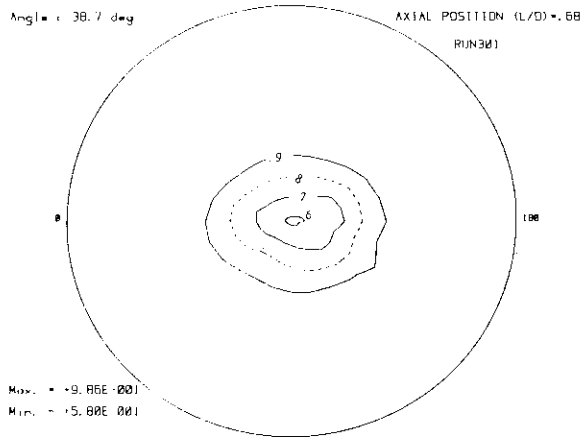
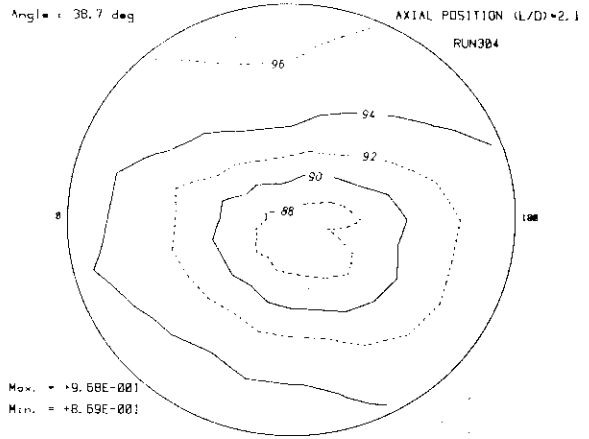


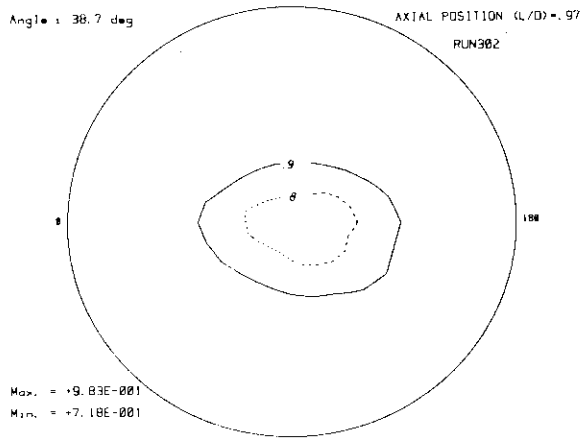
Fig. 5 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=9, 38.7^\circ$)



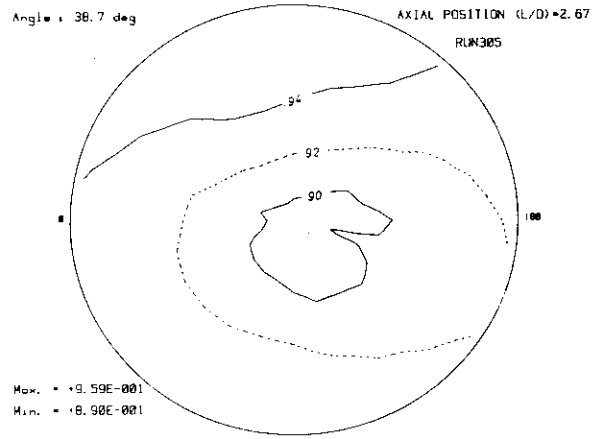
(a)



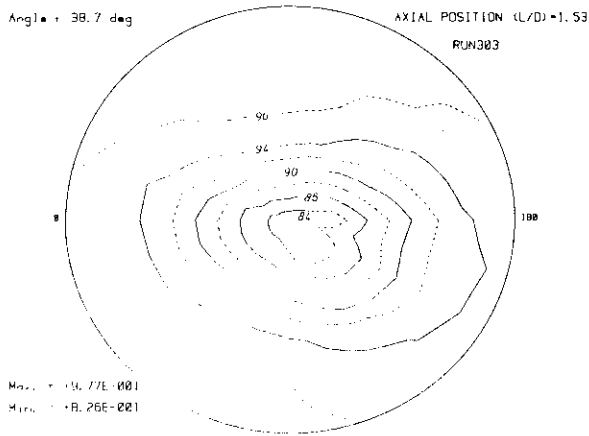
(d)



(b)

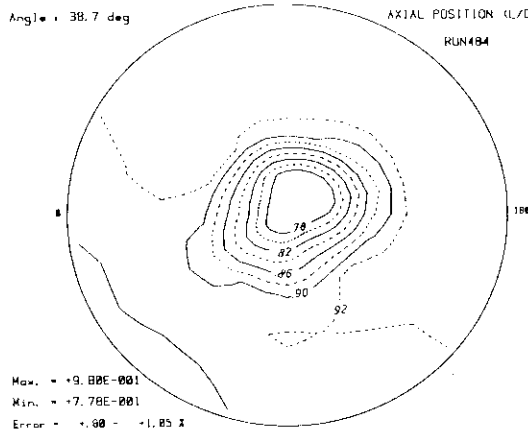


(e)

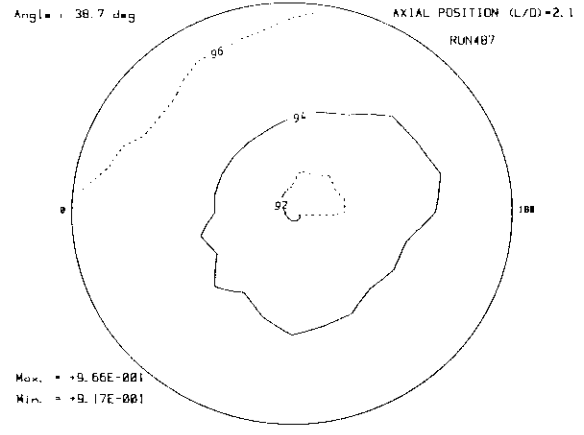


(c)

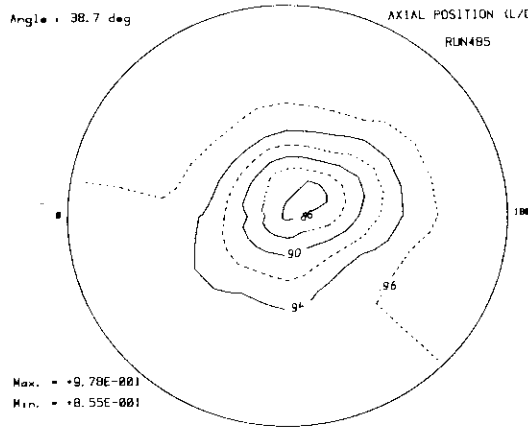
Fig. 6 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=12, 38.7^\circ$)



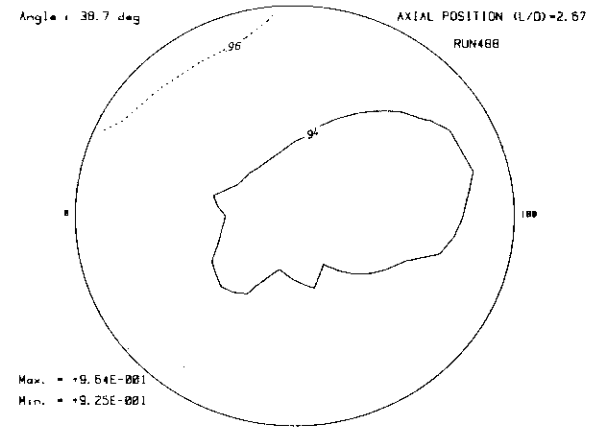
(a)



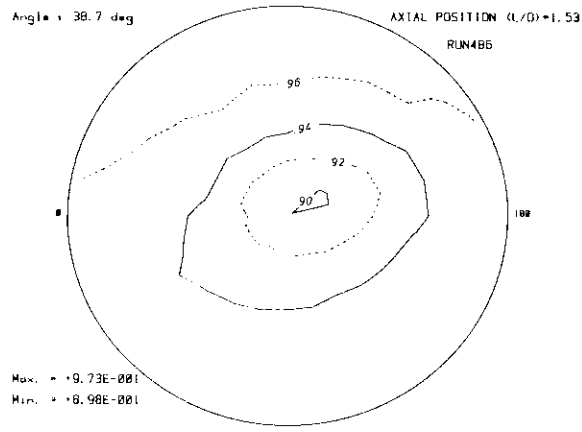
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig. 7 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=18, 38.7^\circ$)

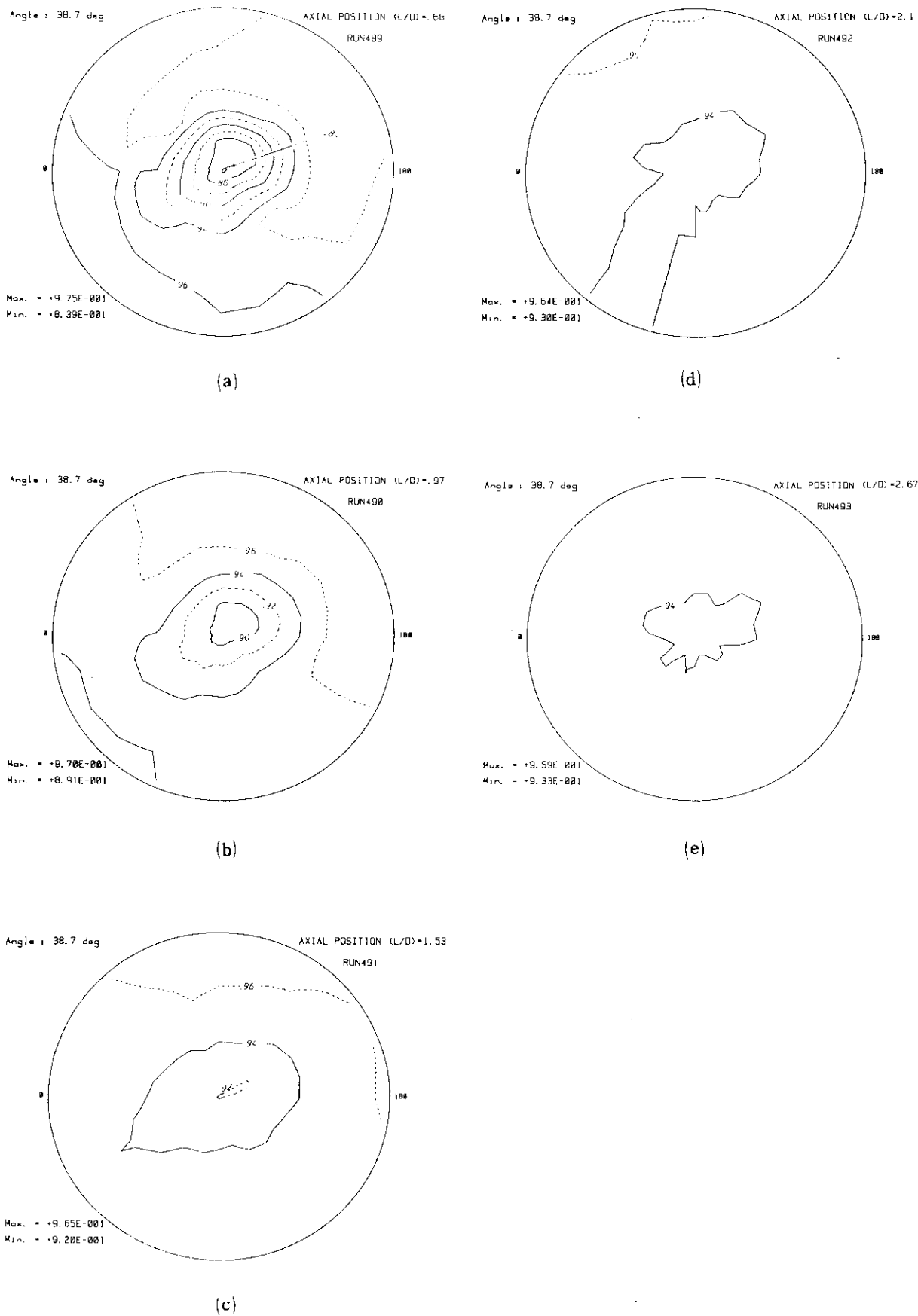


Fig. 8 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=19.7, 38.7^\circ$)

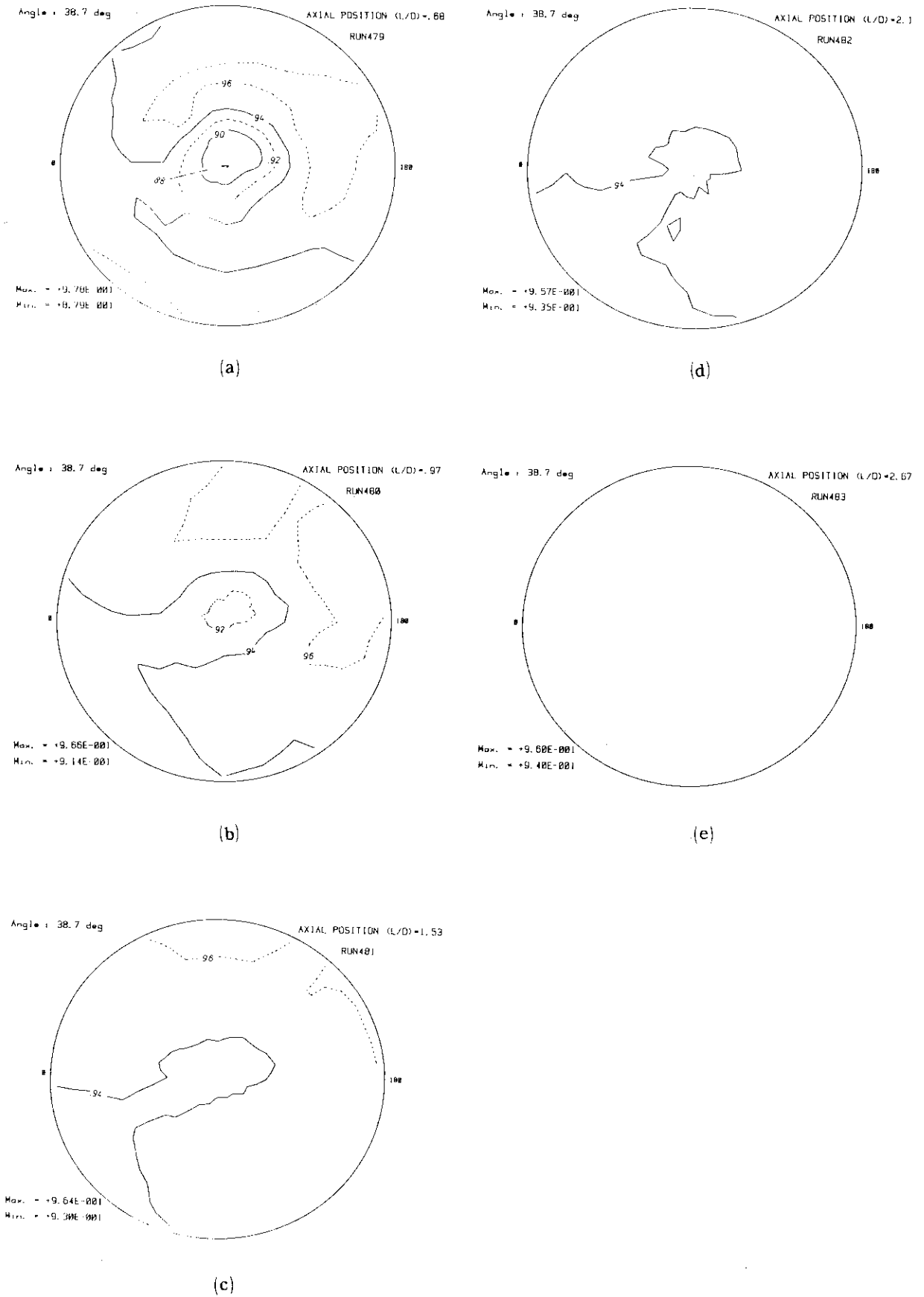
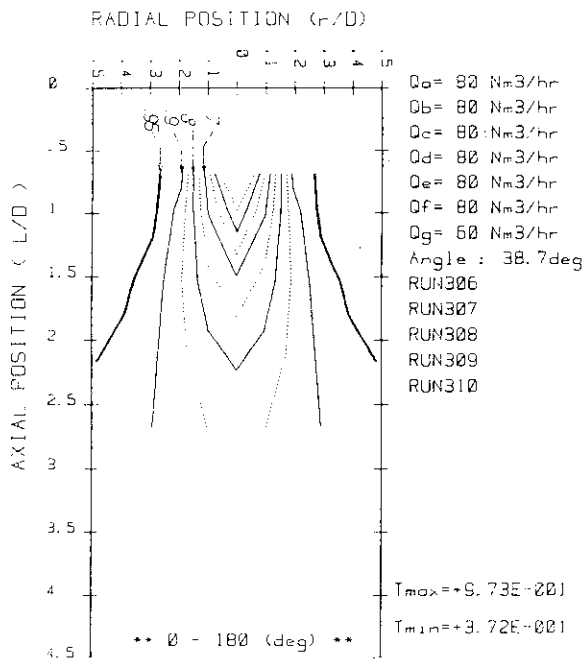
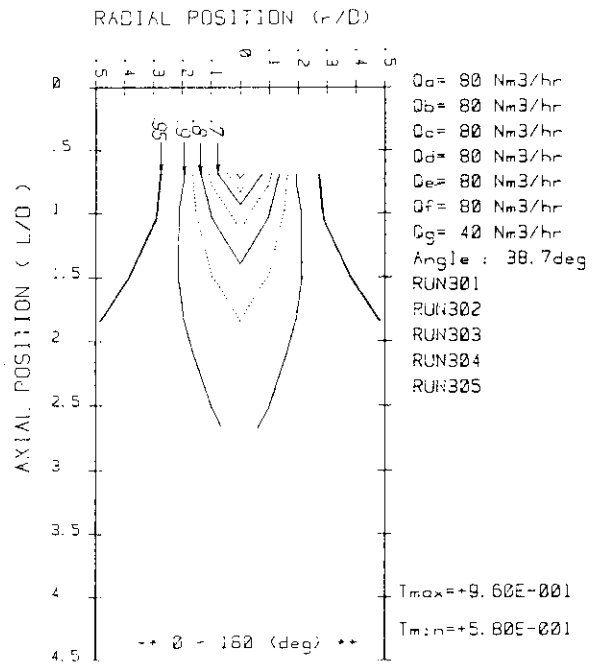


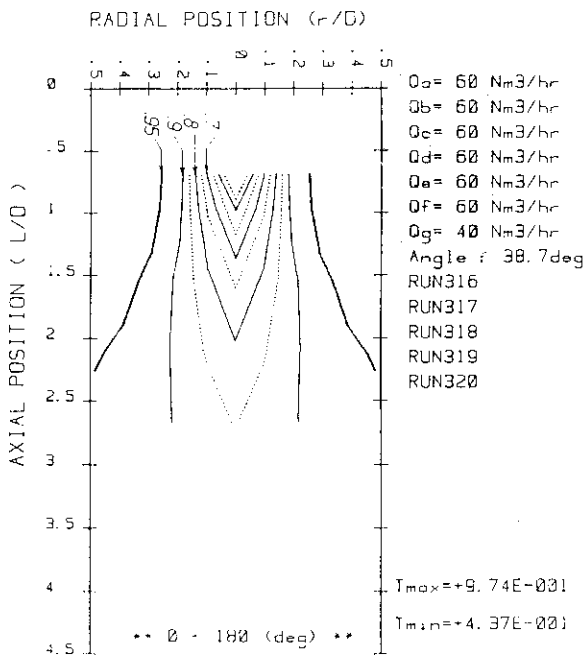
Fig. 9 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=22.5, 38.7^\circ$)



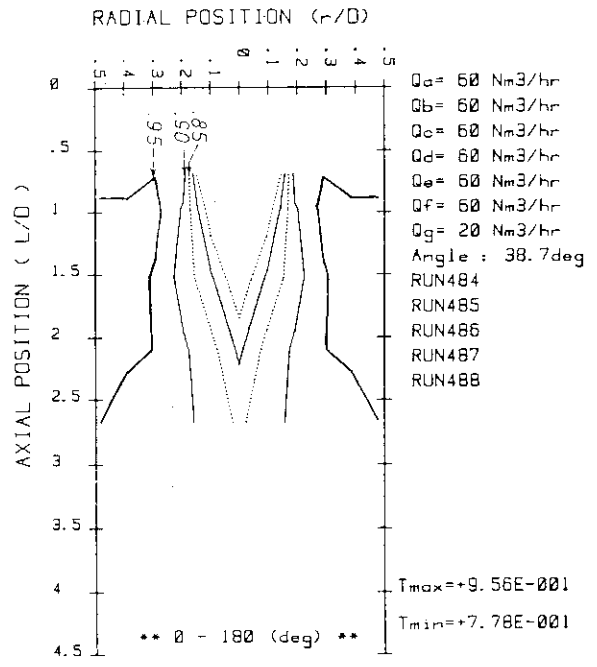
$W_R = 8$



$W_R = 12$

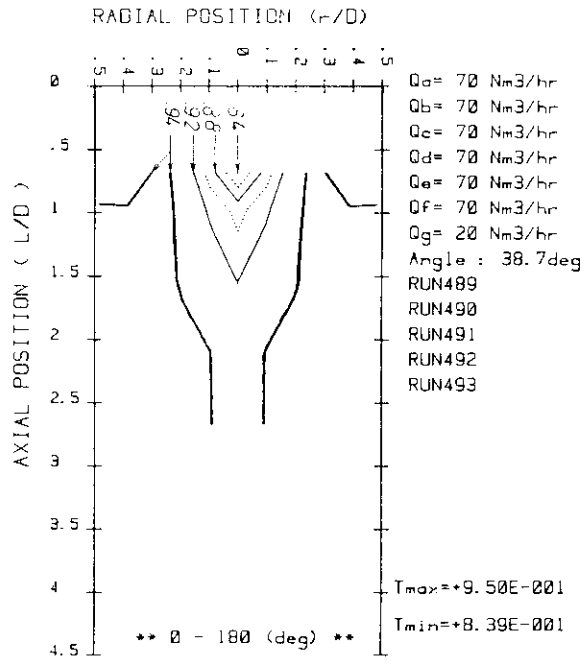


$W_R = 9$

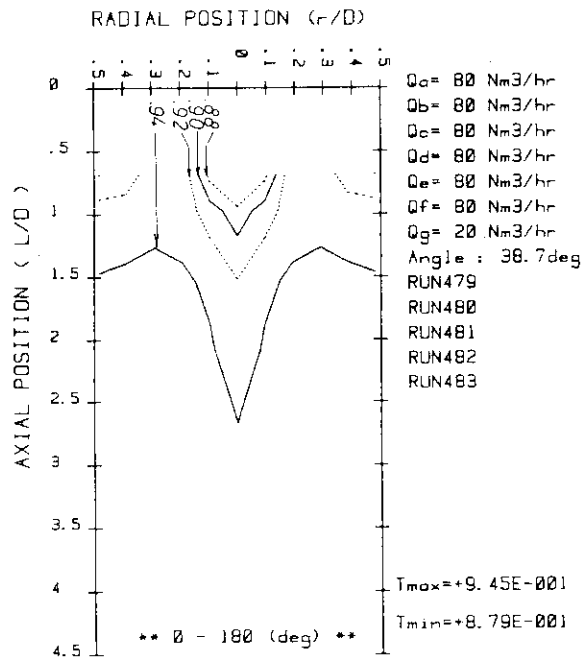


$W_R = 18$

Fig.10 Temperature contours at the vertical cross-section of the test model ($W_R=8-22.5, 38.7^\circ$)

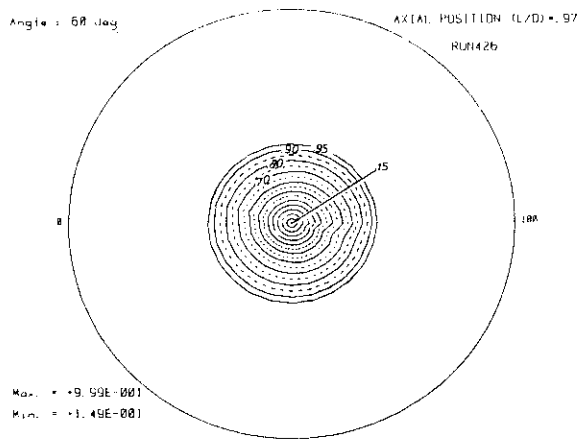


$W_R = 19.7$

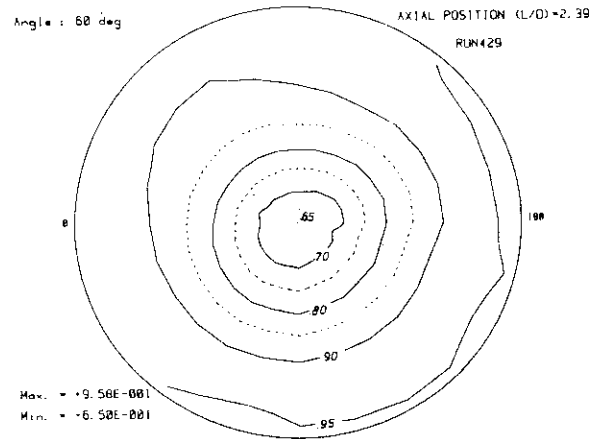


$W_R = 22.5$

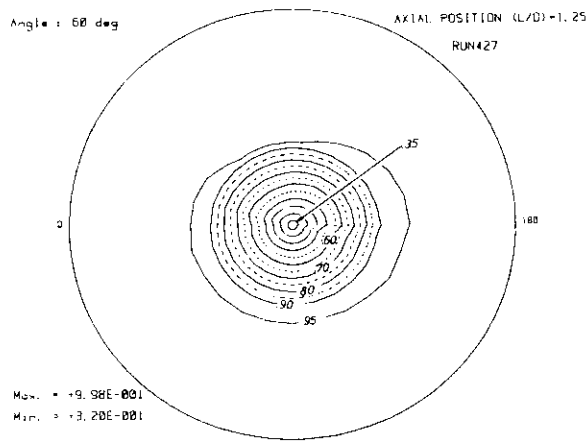
Fig.10 (Continued)



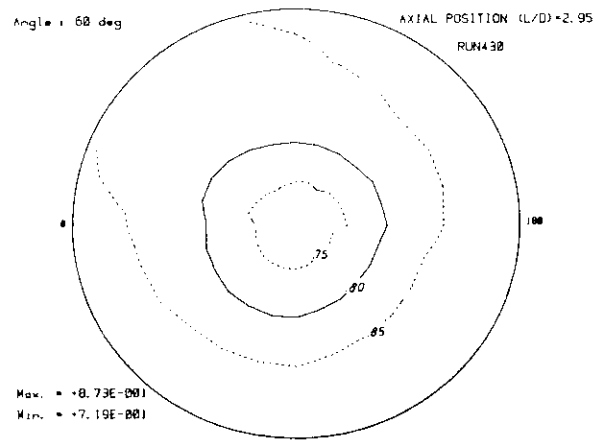
(a)



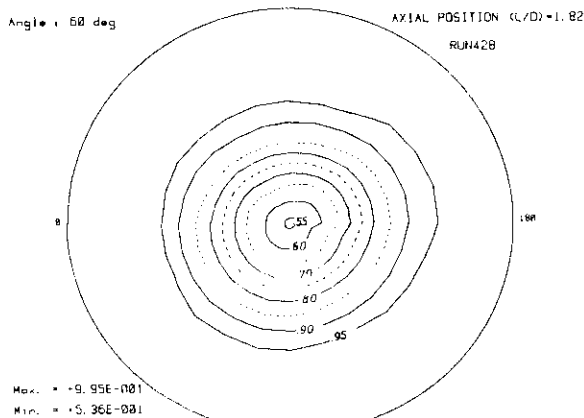
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig.11 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=4, 60^\circ$)

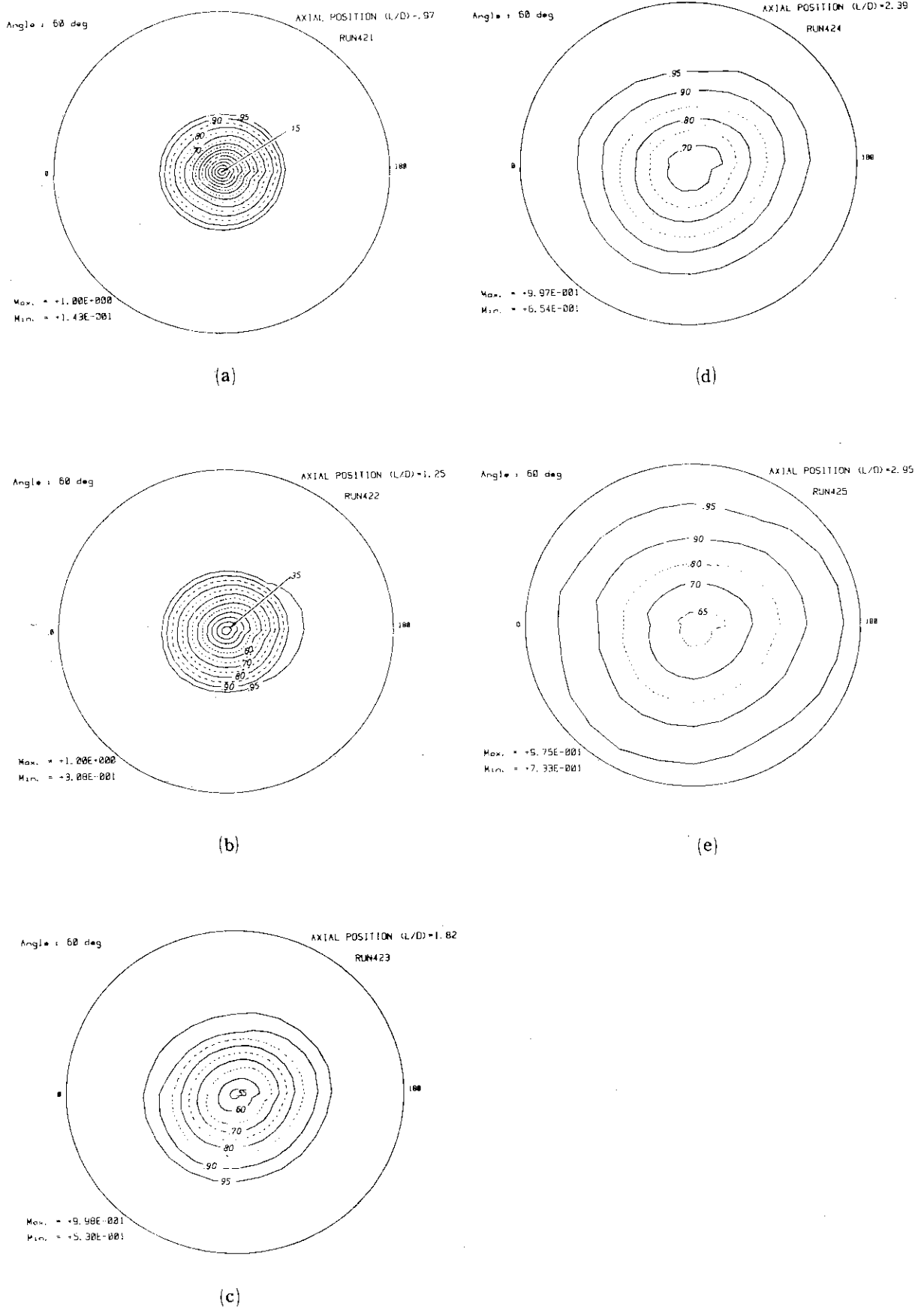
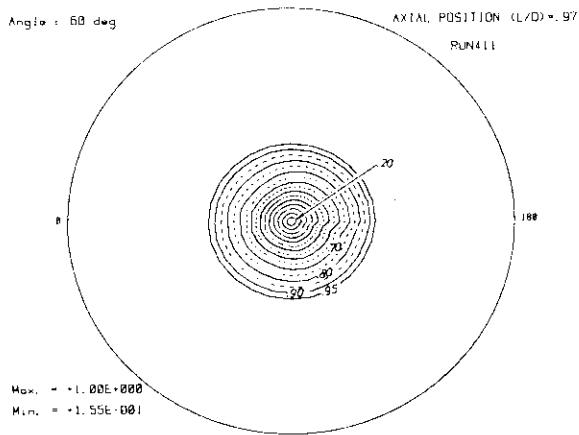
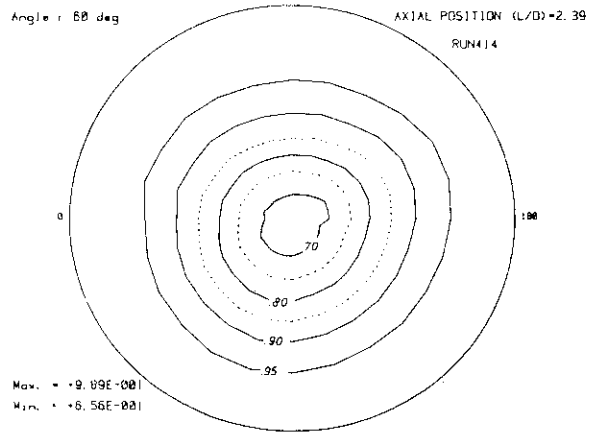


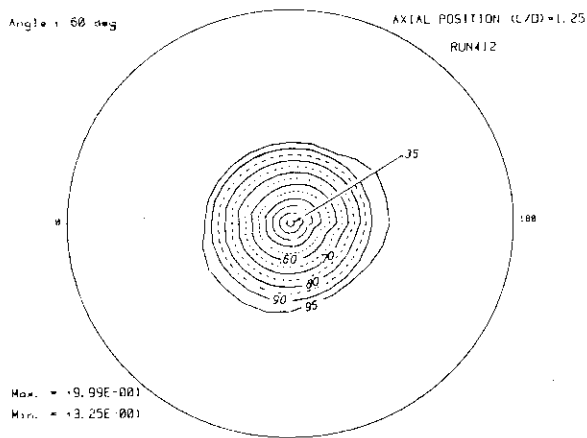
Fig.12 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=6, 60^\circ$)



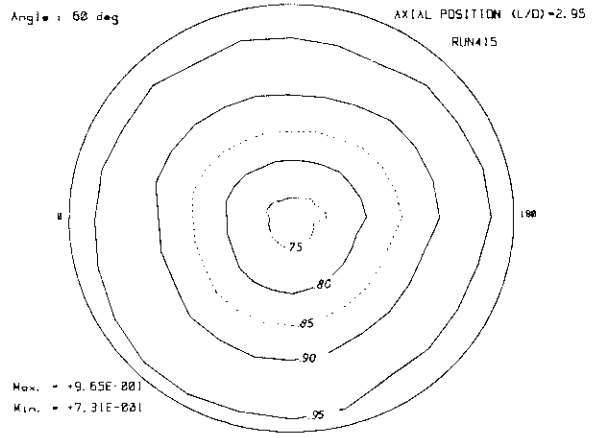
(a)



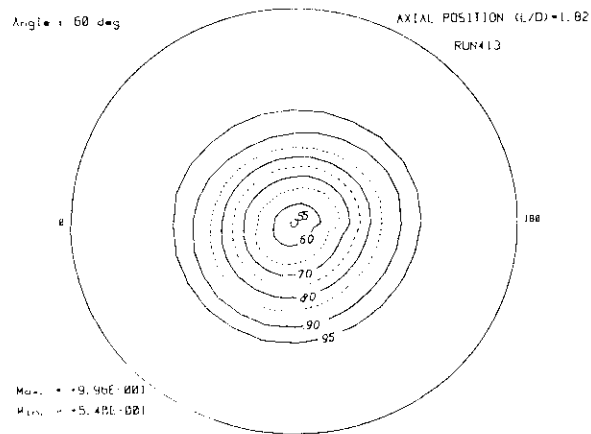
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig.13 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_3=6, 60^\circ$)

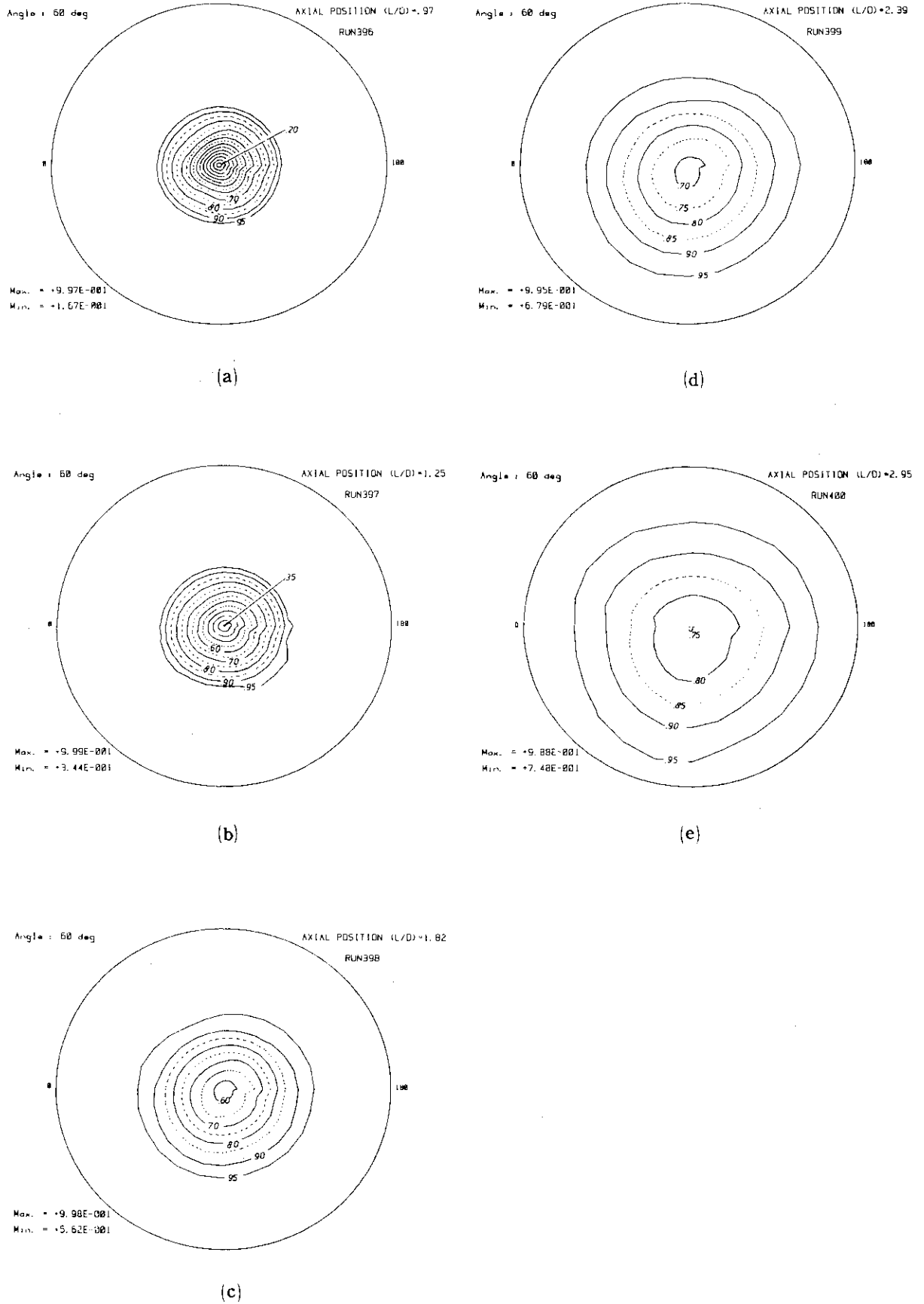


Fig.14 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=8, 60^\circ$)

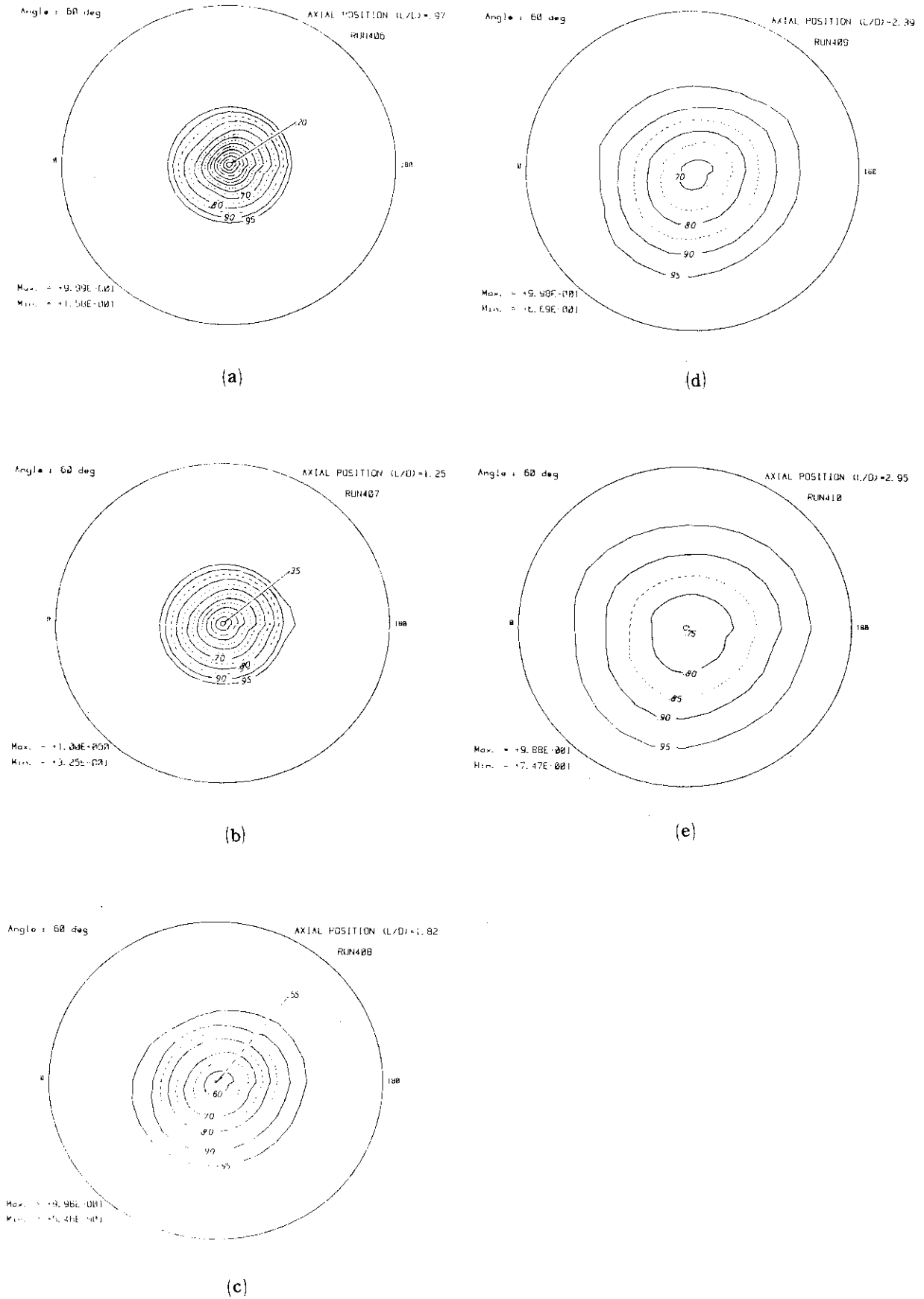
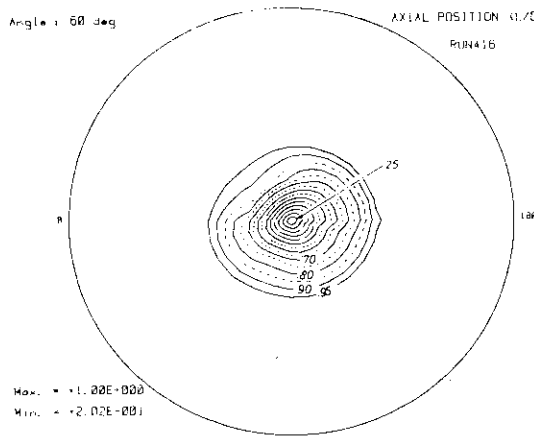
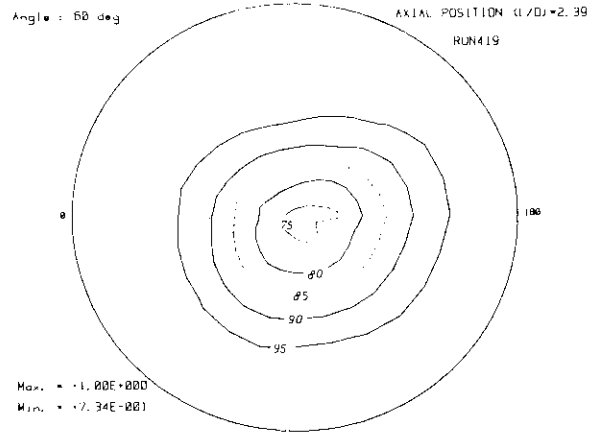


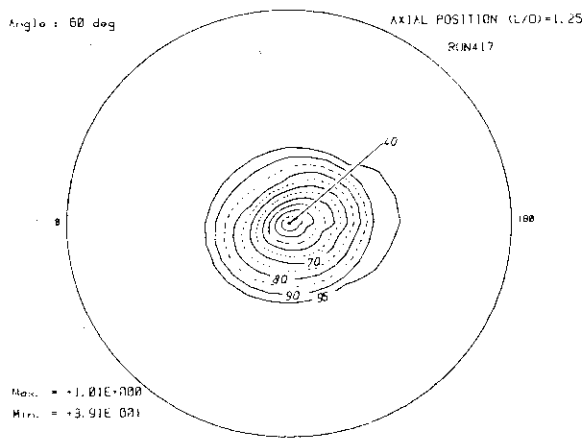
Fig.15 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=9, 60^\circ$)



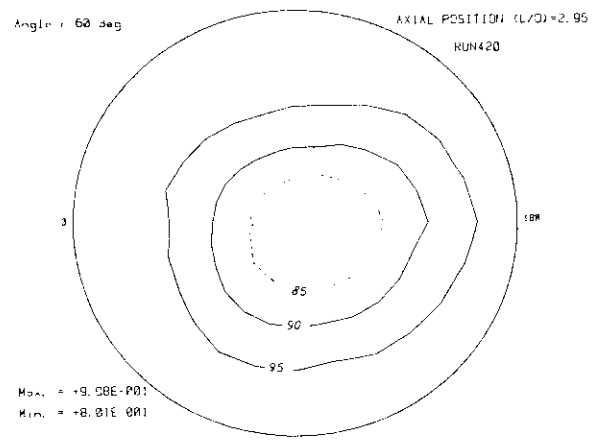
(a)



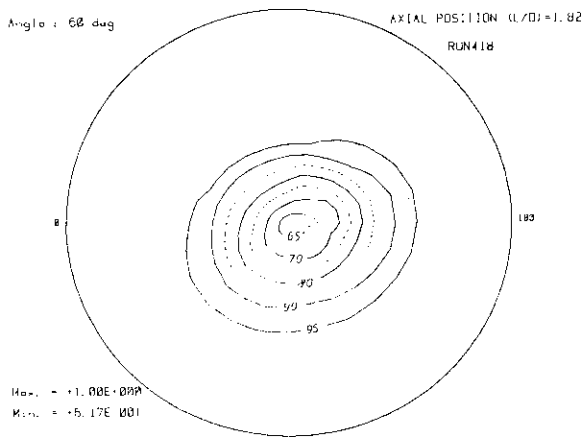
(d)



(b)

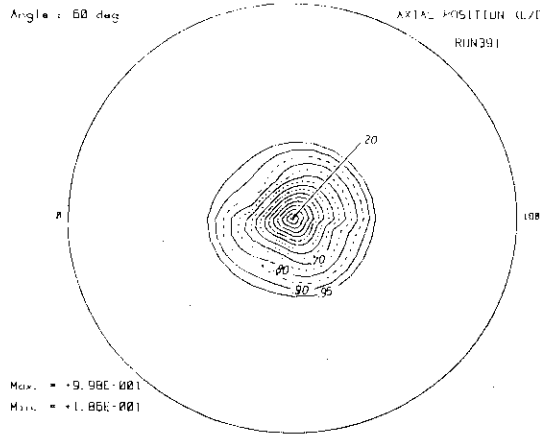


(e)

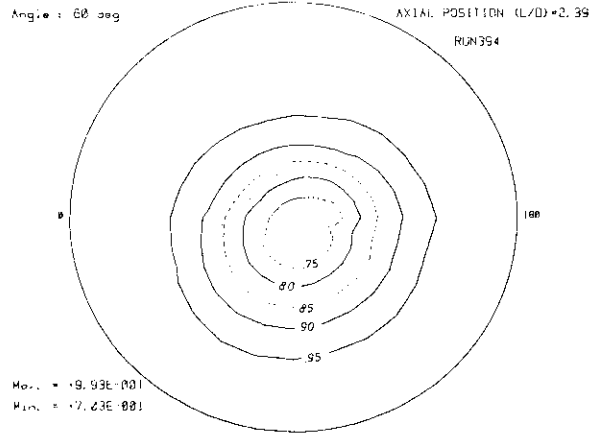


(c)

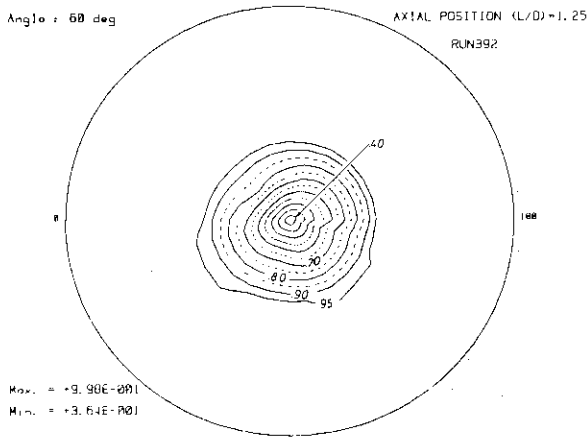
Fig.16 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=12, 60^\circ$)



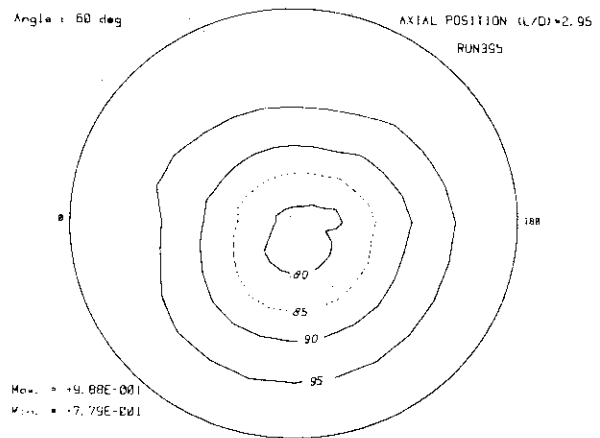
(a)



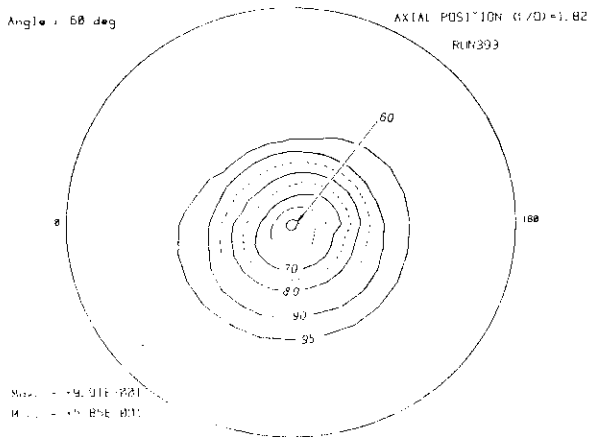
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig.17 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=12, 60^\circ$)

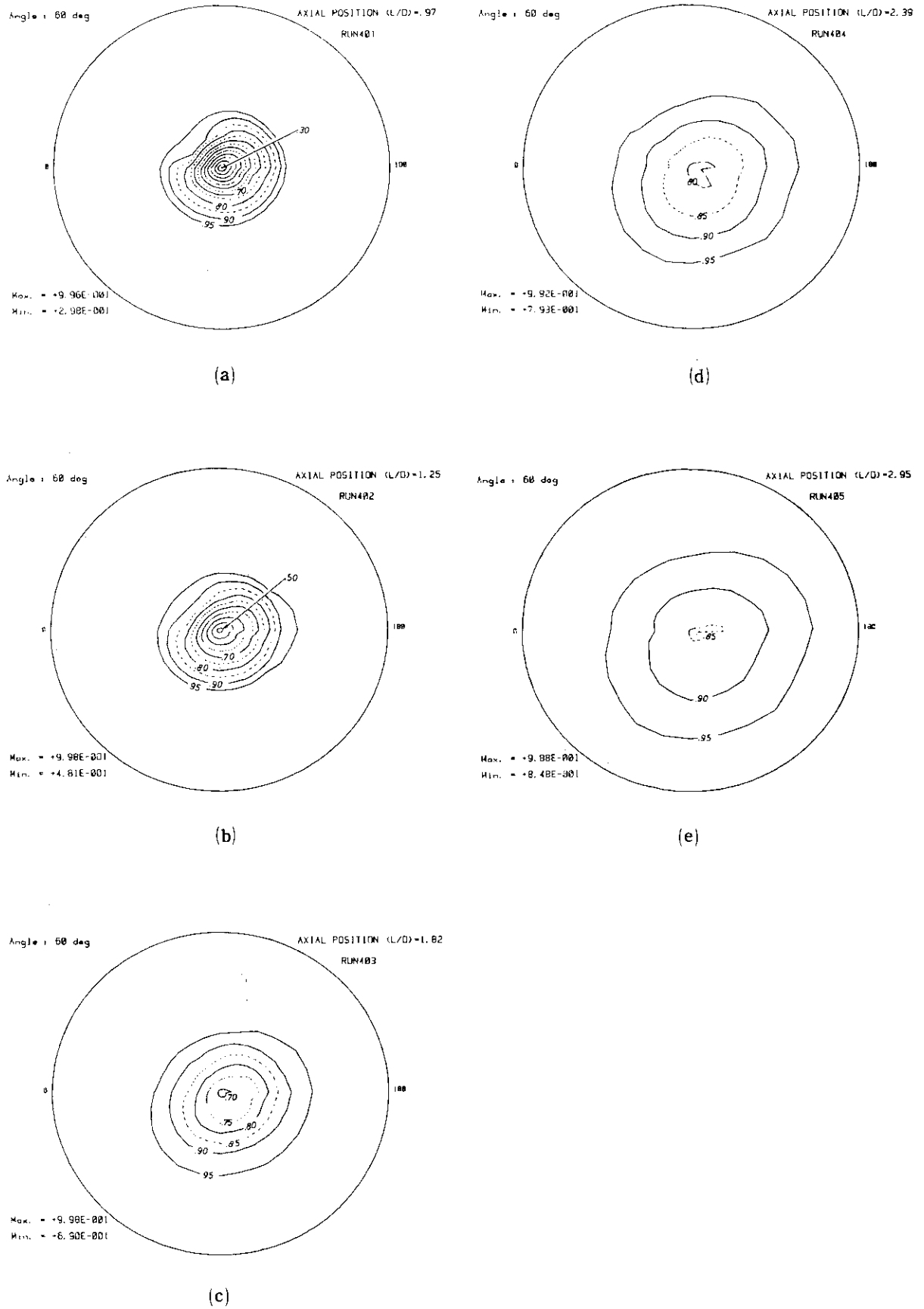
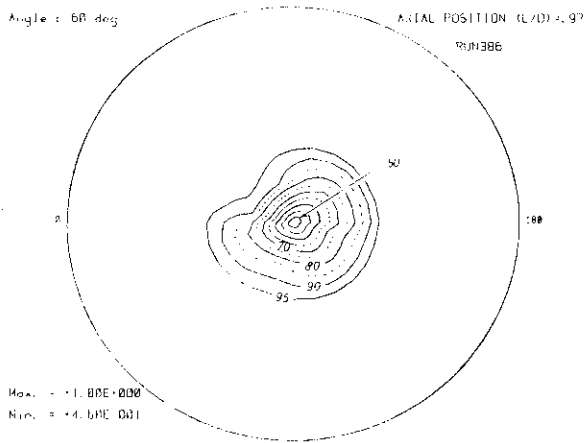
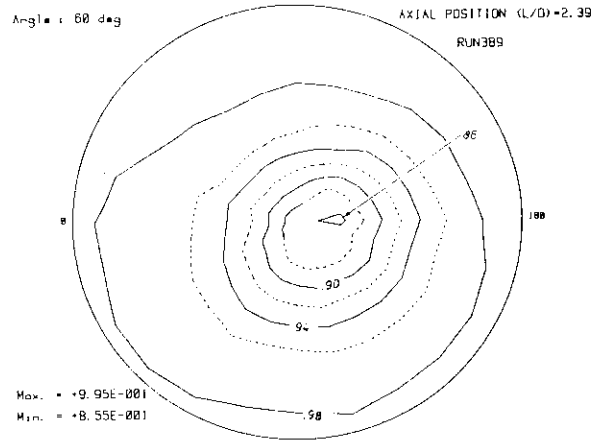


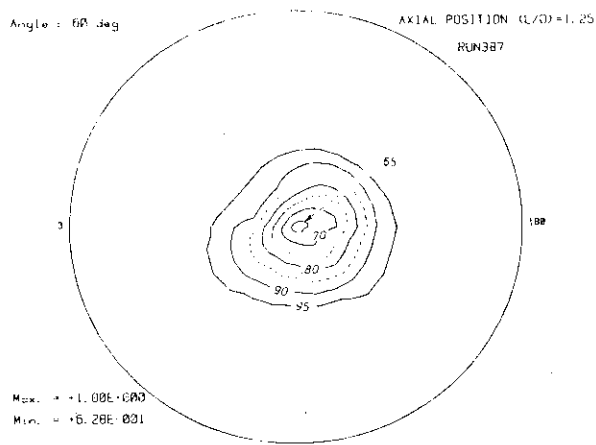
Fig.18 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=18, 60^\circ$)



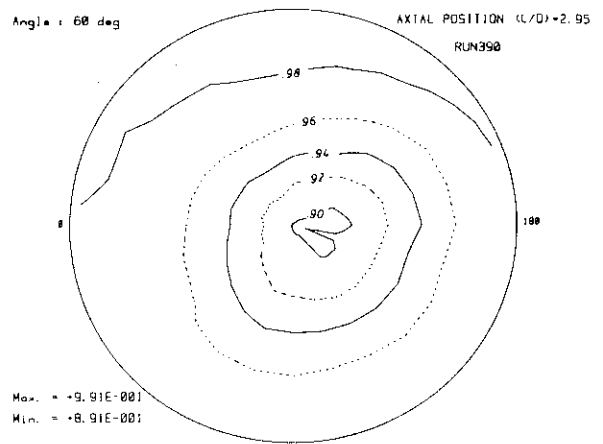
(a)



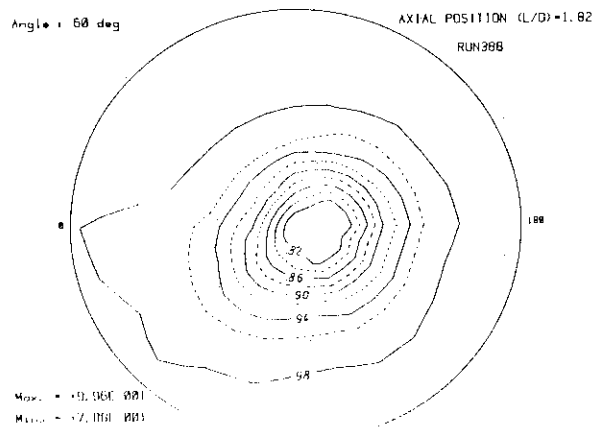
(d)



(b)

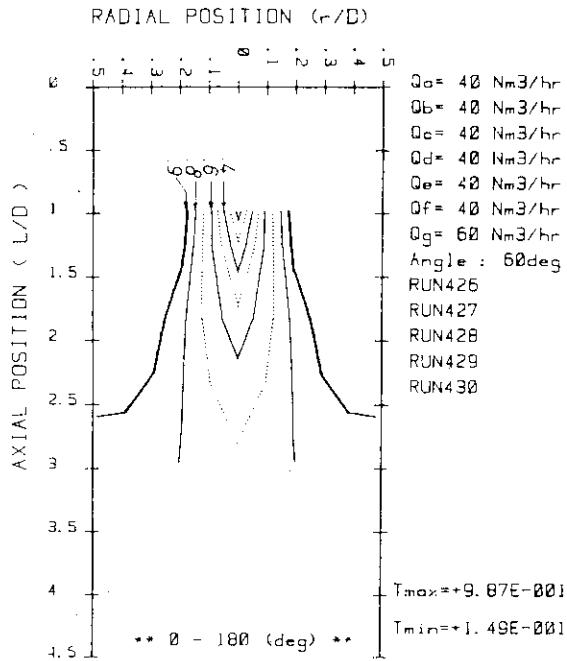


(e)

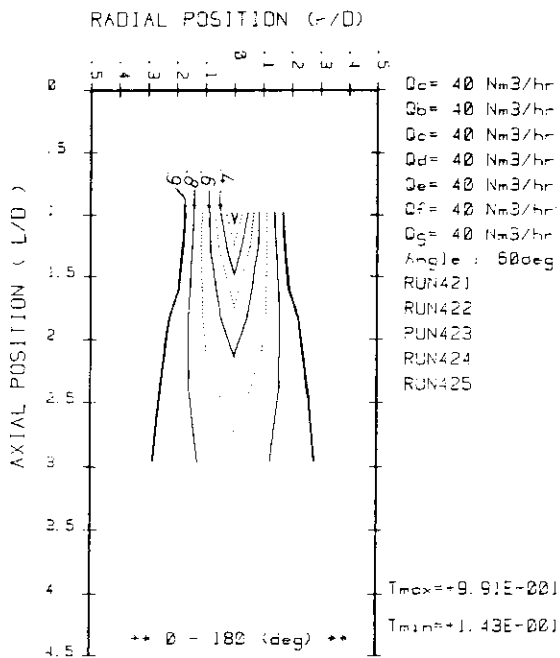


(c)

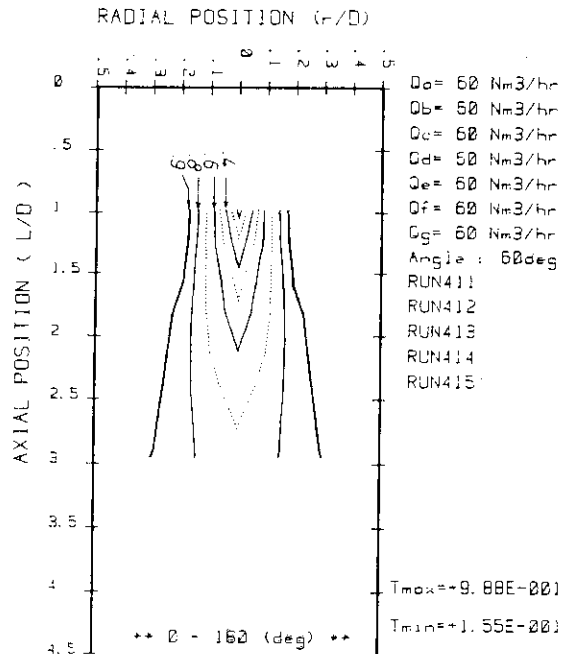
Fig.19 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=22.5, 60^\circ$)



$W_R = 4$

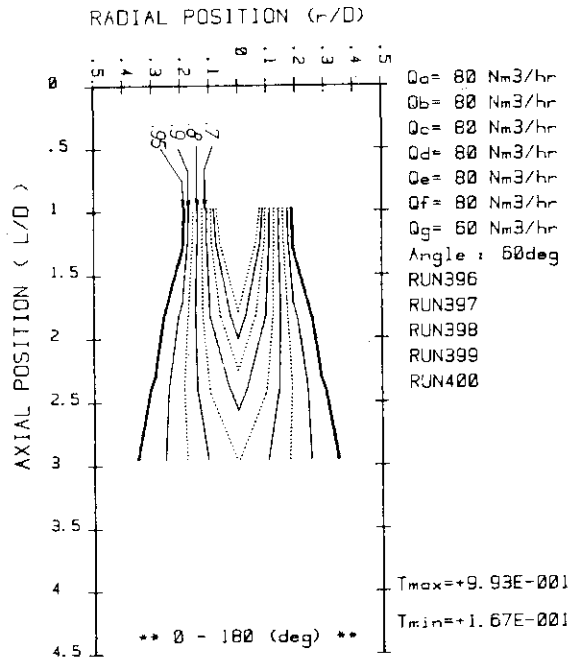


$W_R = 6$

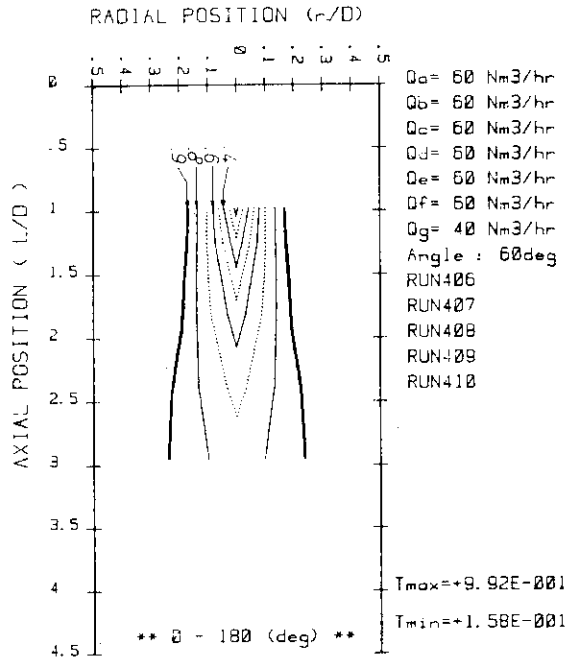


$W_R = 6$

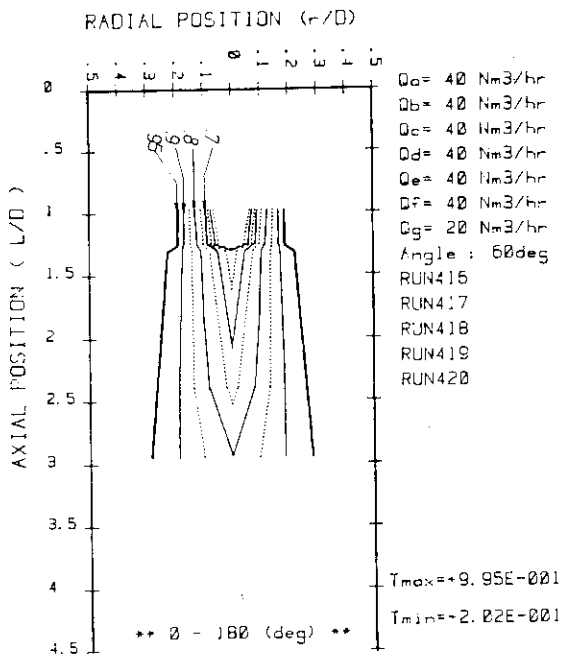
Fig.20 Temperature contours at the vertical cross-section of the test model ($W_R=4-22.5, 60^\circ$)



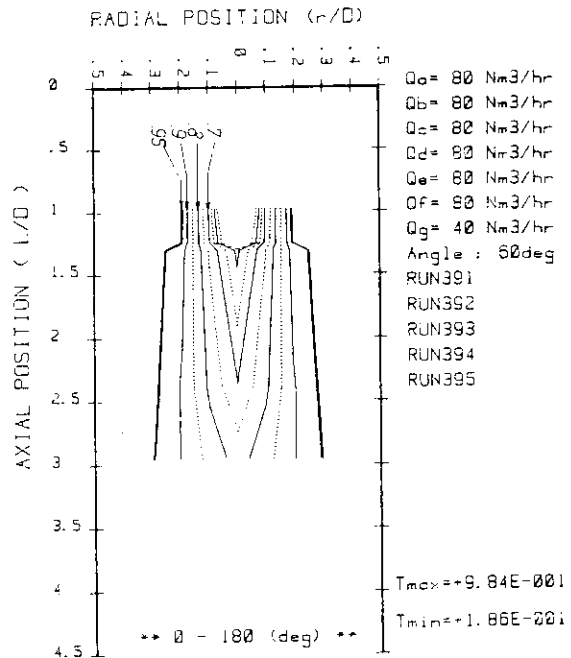
$W_R = 8$



$W_R = 9$

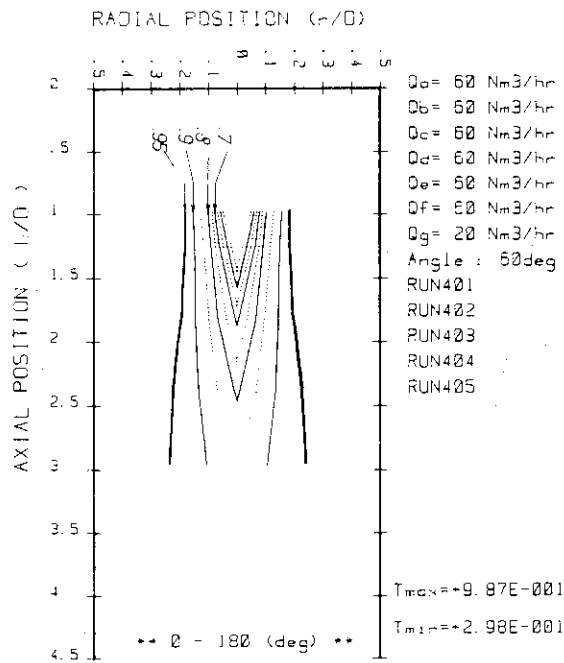


$W_R = 12$

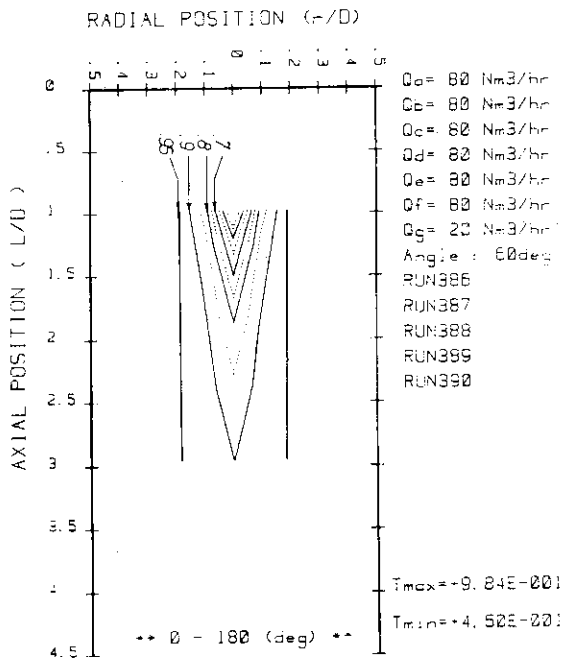


$W_R = 12$

Fig.20 (Continued)



$W_R = 18$



$W_R = 22.5$

Fig.20 (Continued)

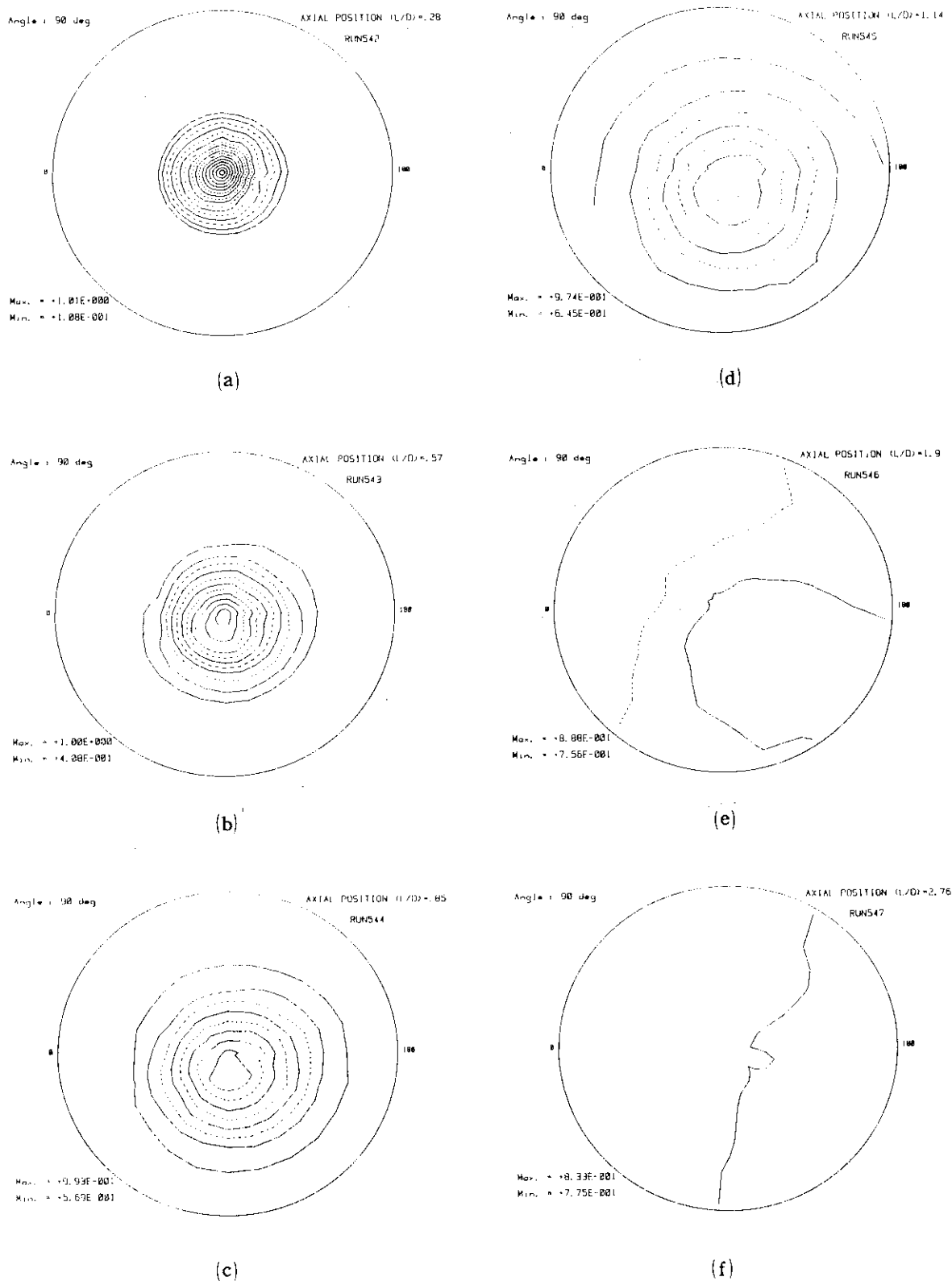


Fig.21 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=4, 90^\circ$)

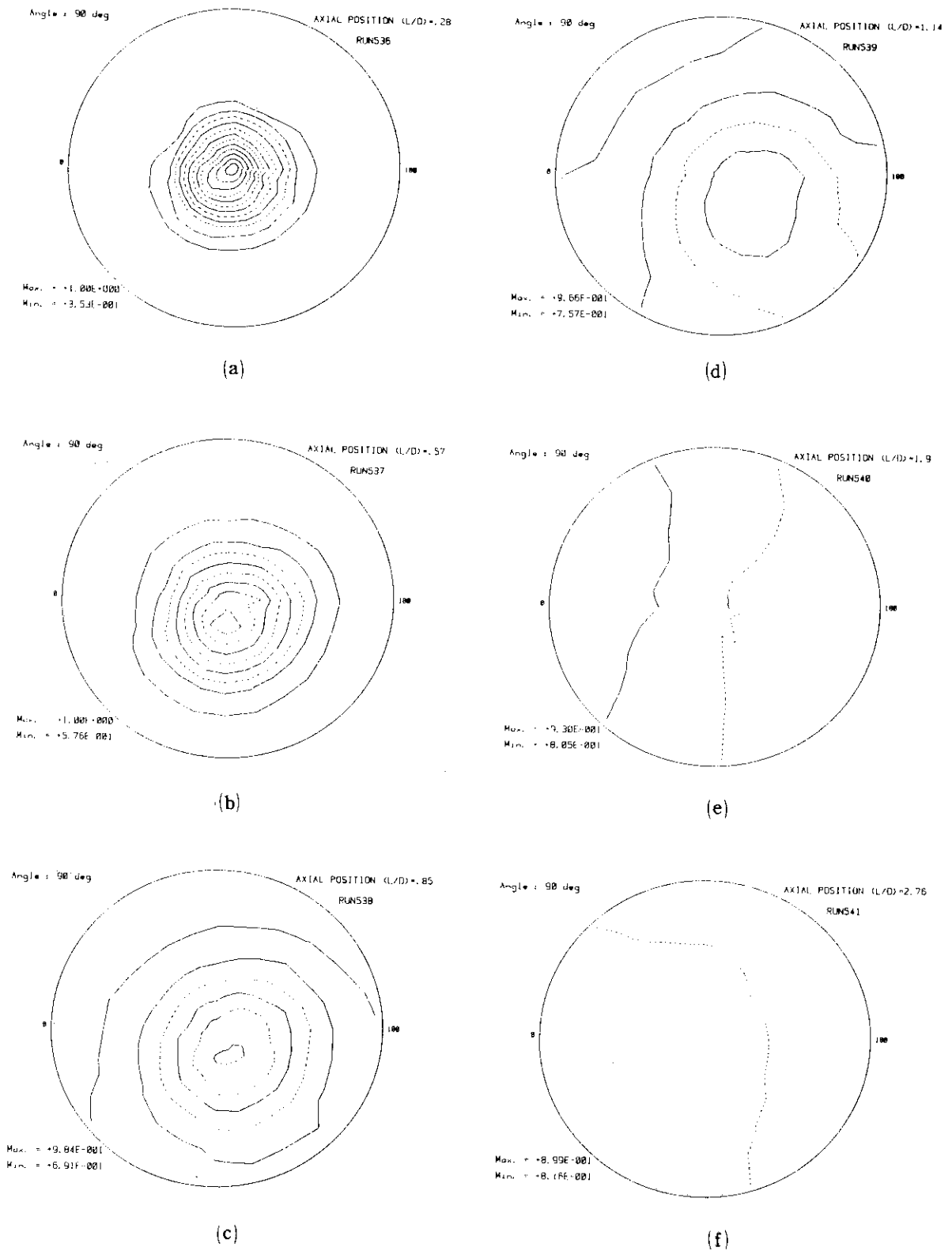


Fig.22 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=6, 90^\circ$)

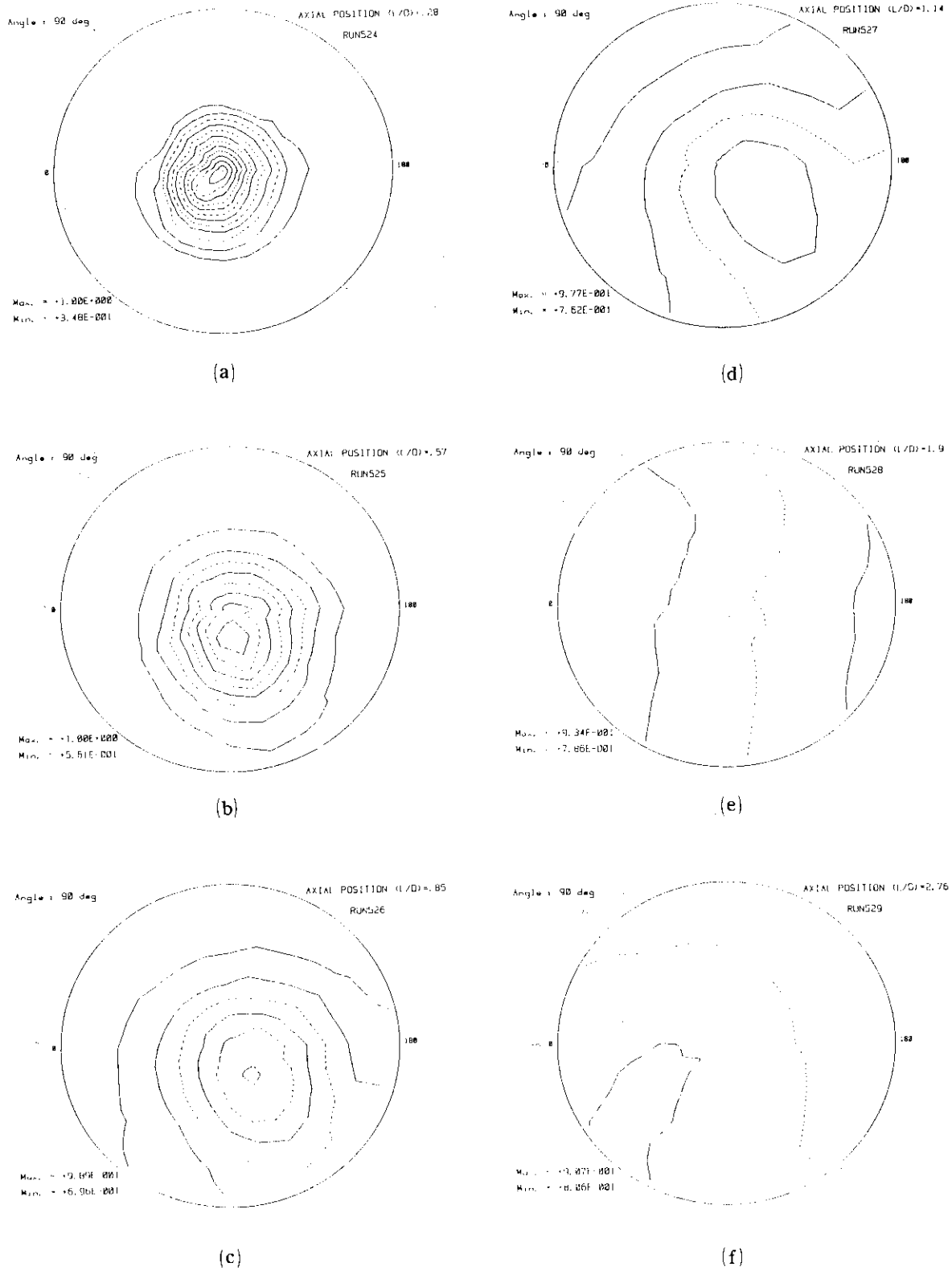


Fig.23 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=6, 90^\circ$)

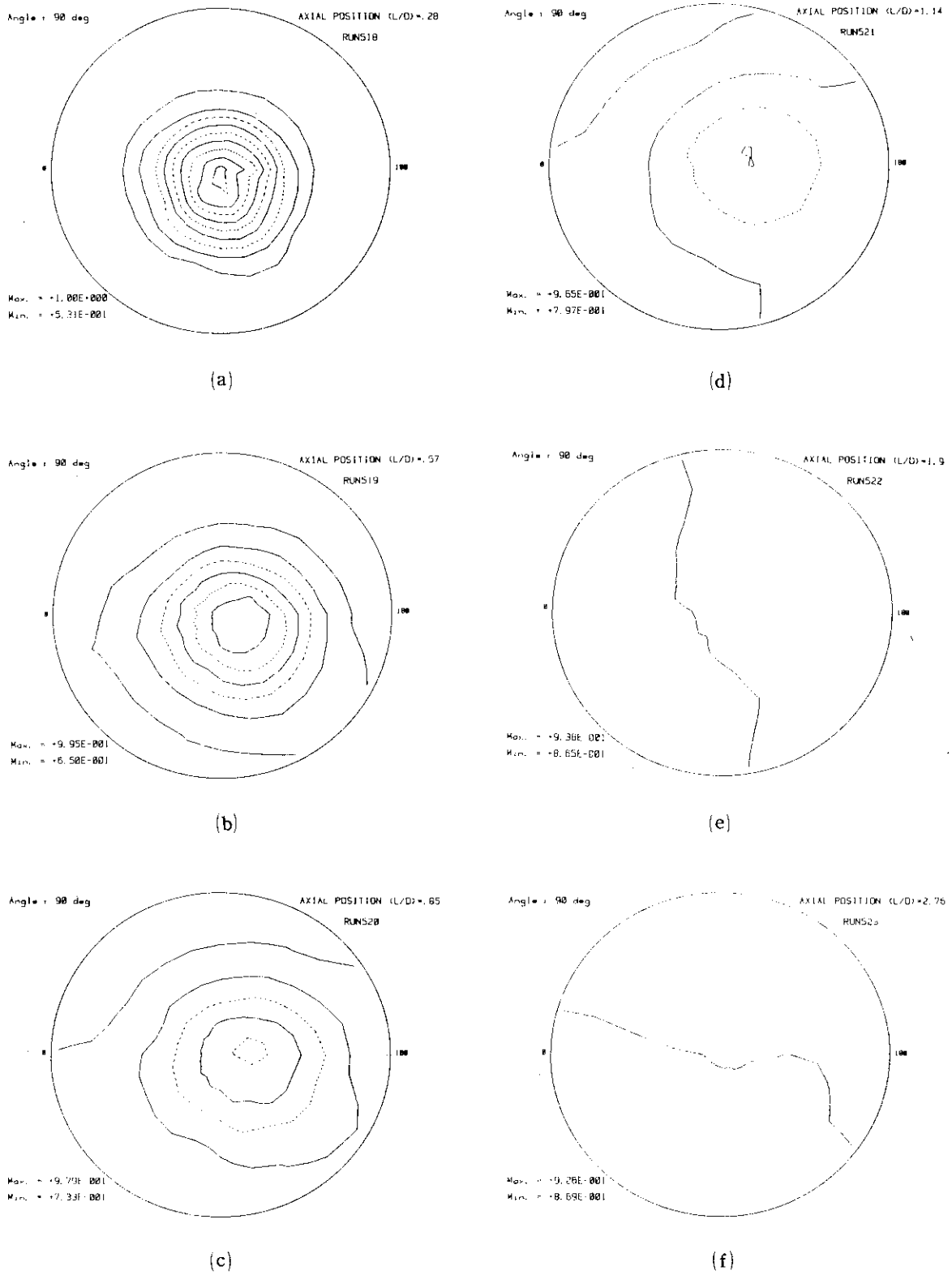


Fig.24 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=8, 90^\circ$)

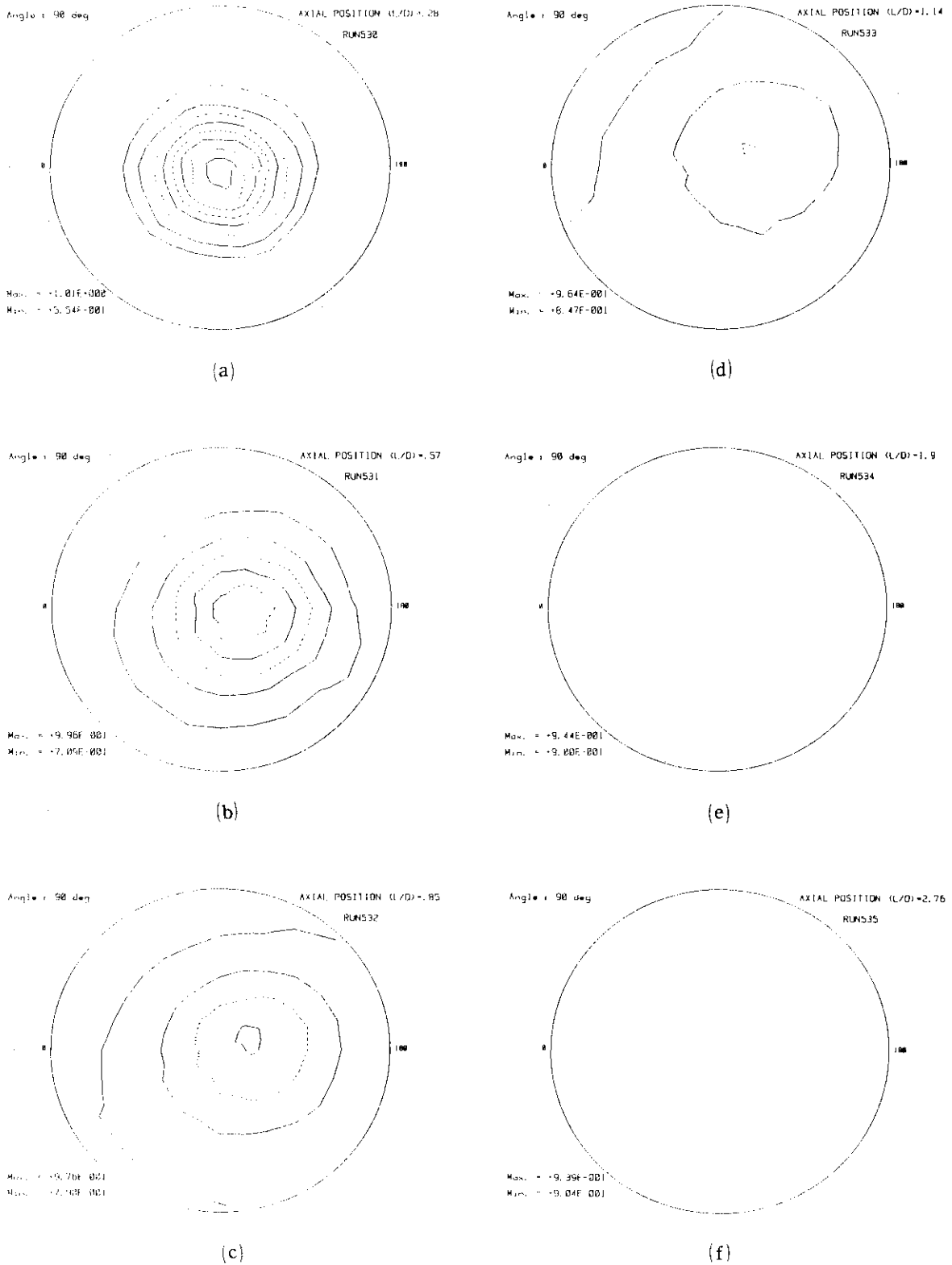


Fig.25 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=9, 90^\circ$)

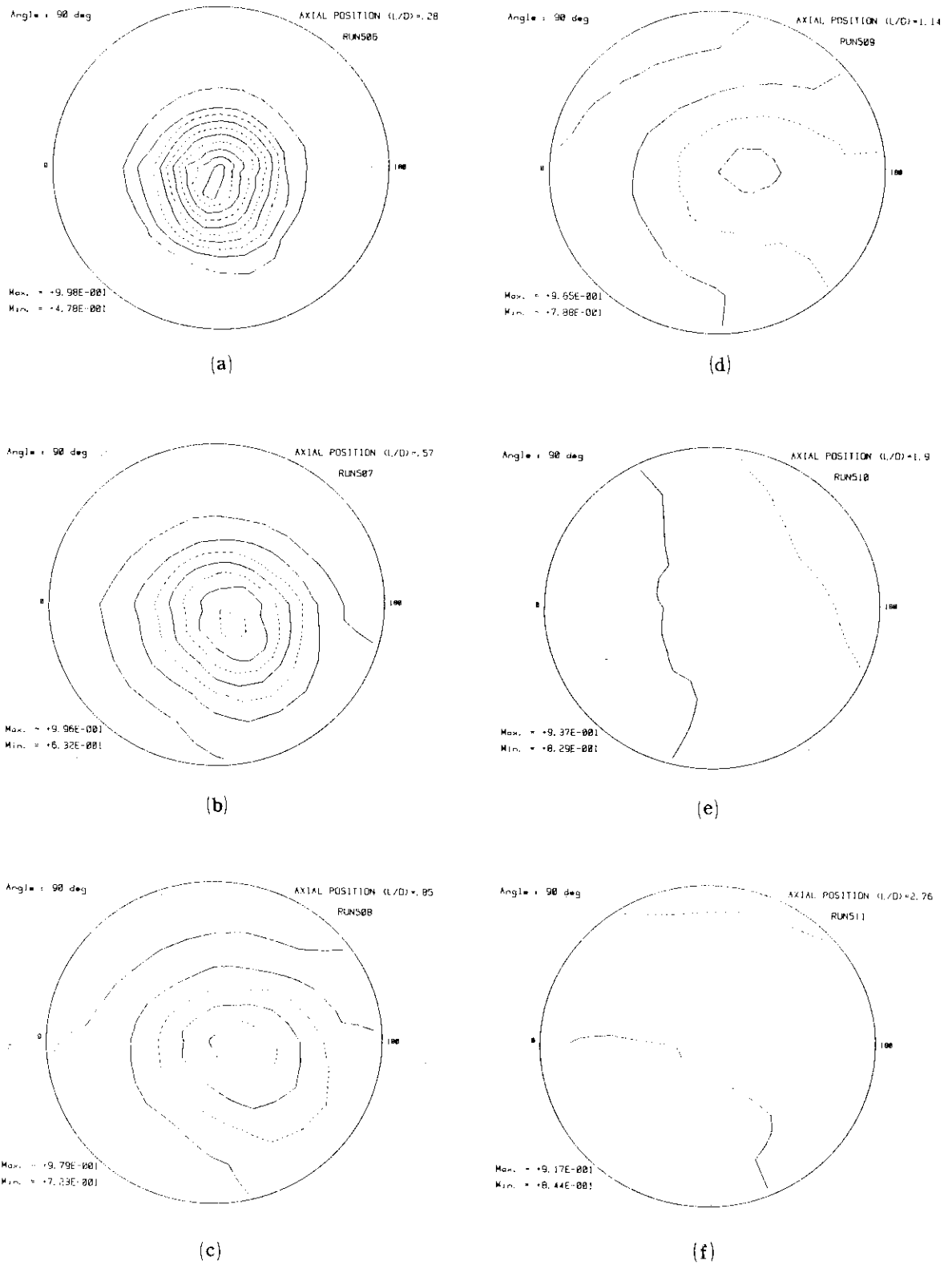


Fig.26 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=12, 90^\circ$)

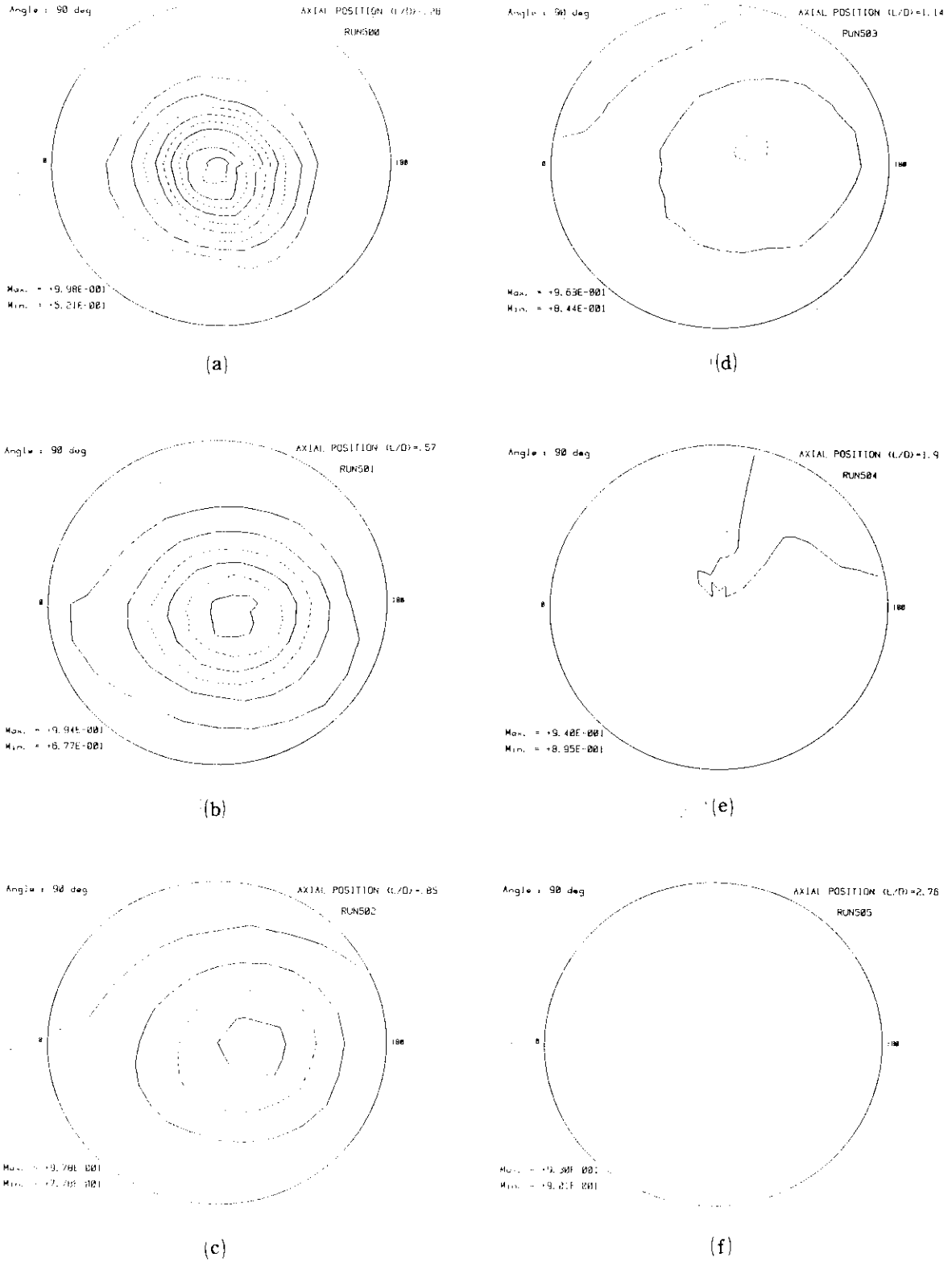


Fig.27 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=12, 90^\circ$)

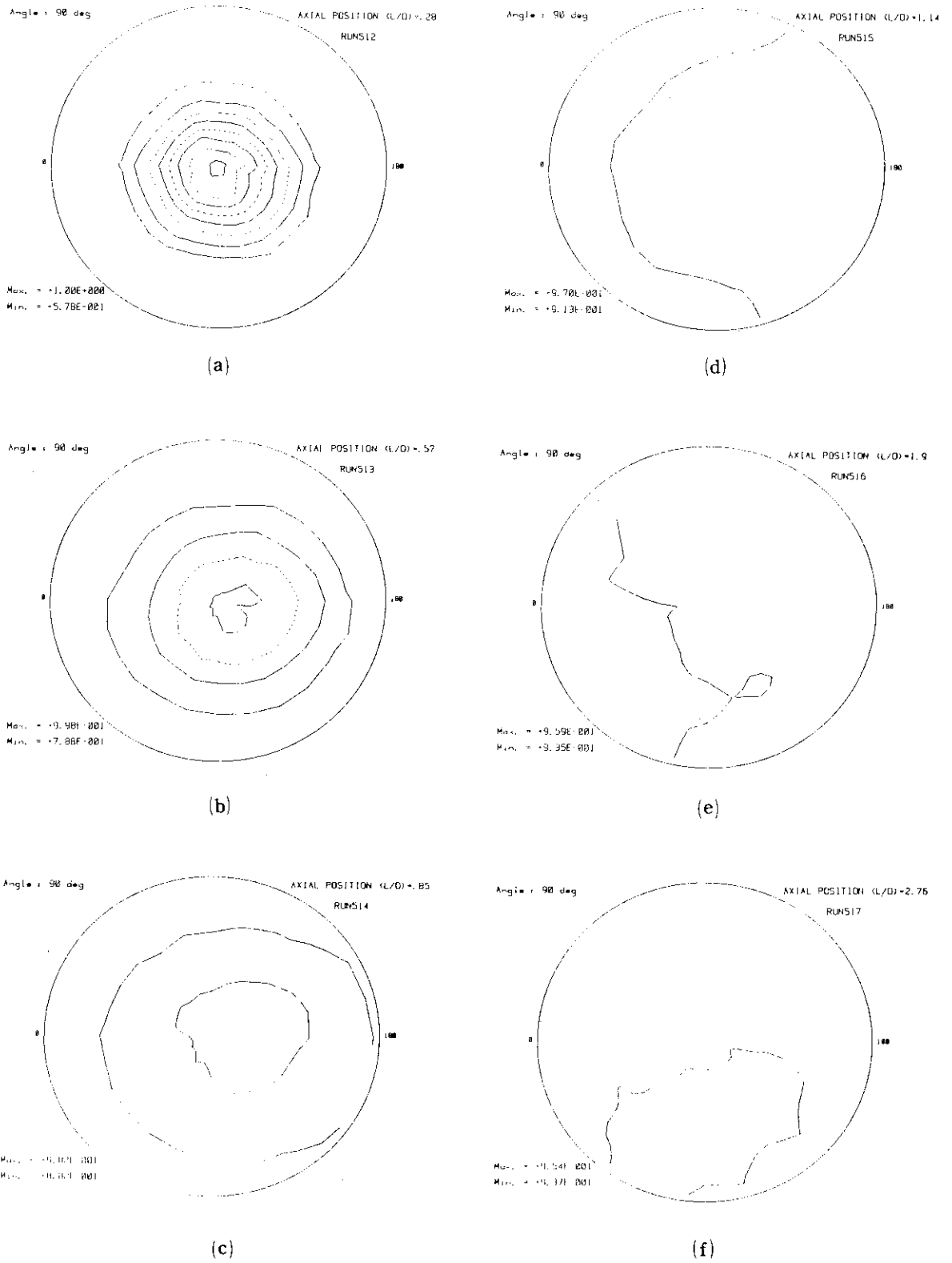


Fig.28 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=18, 90^\circ$)

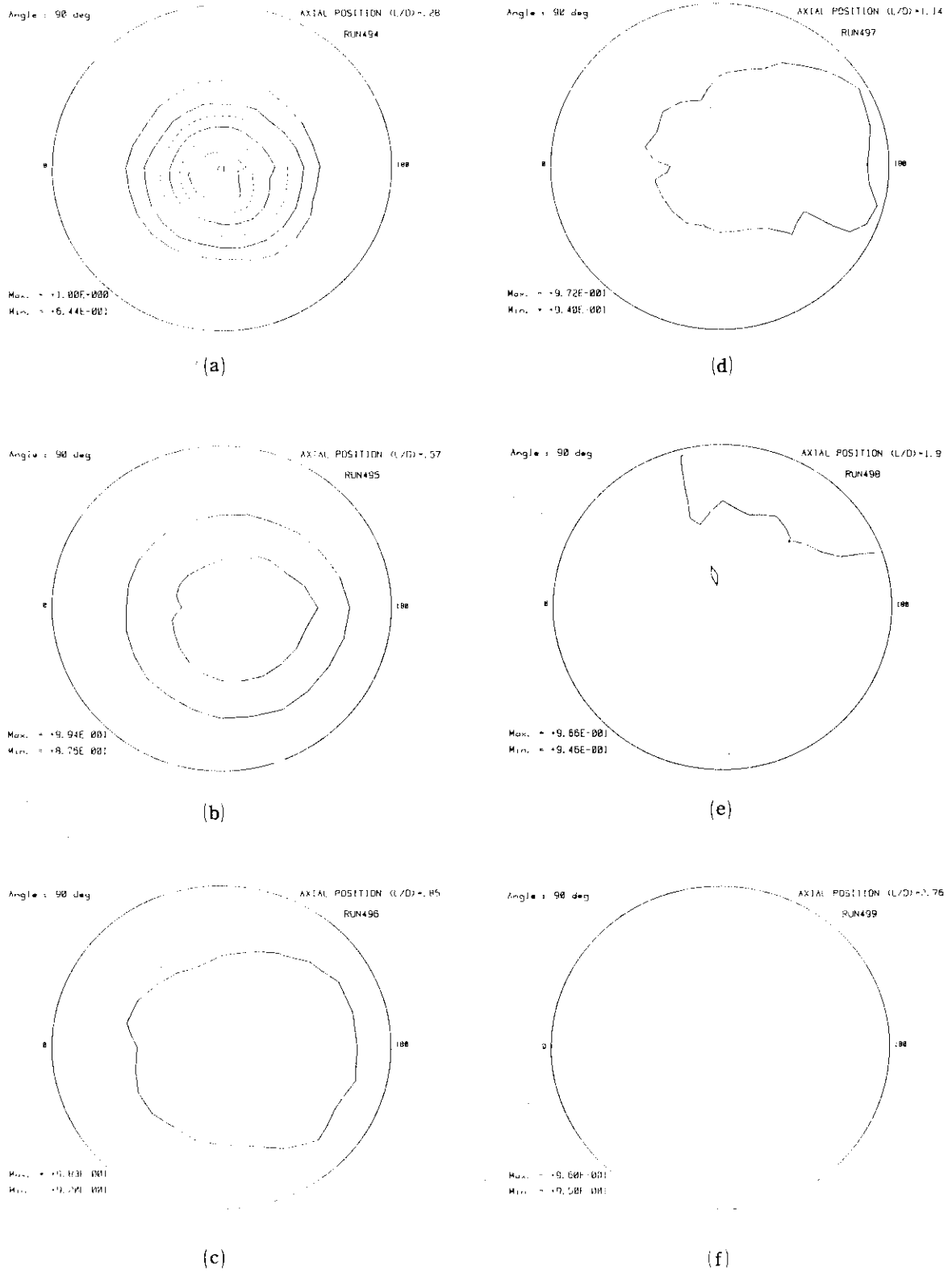
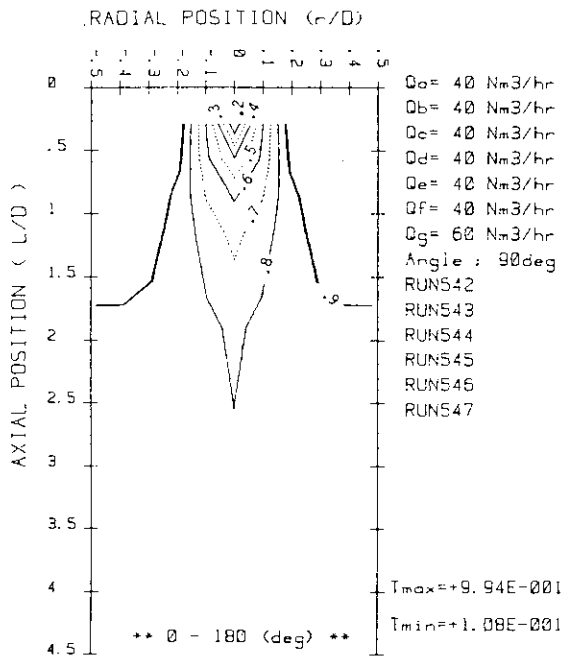
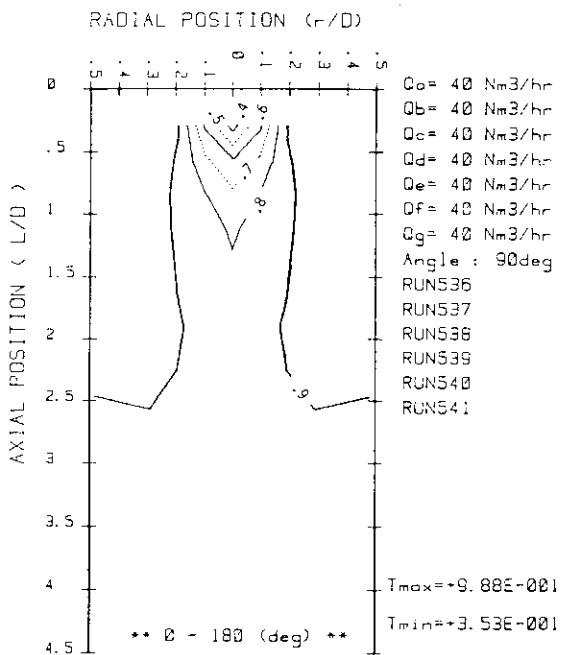


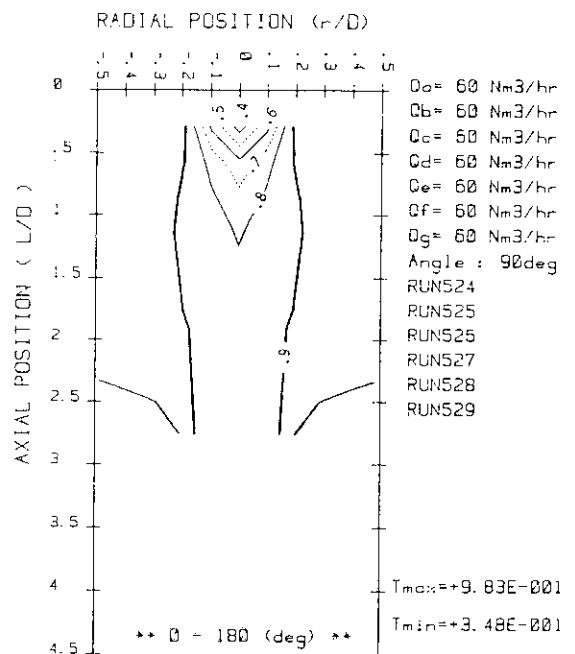
Fig.29 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model ($W_R=22.5, 90^\circ$)



$W_R = 4$

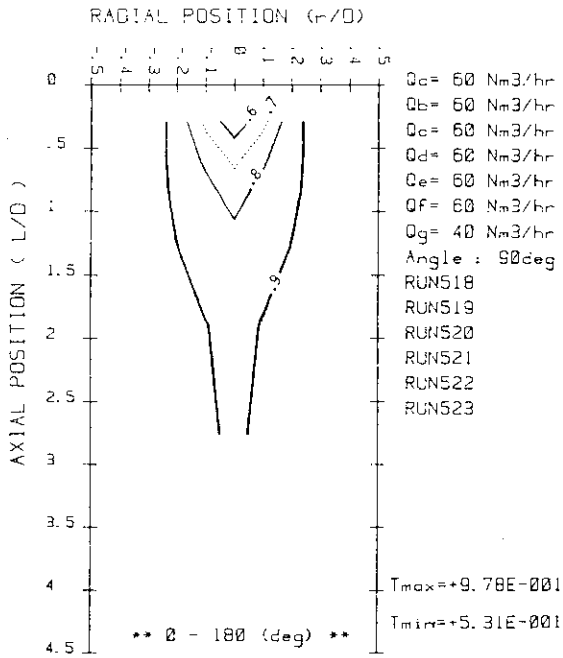


$W_R = 6$

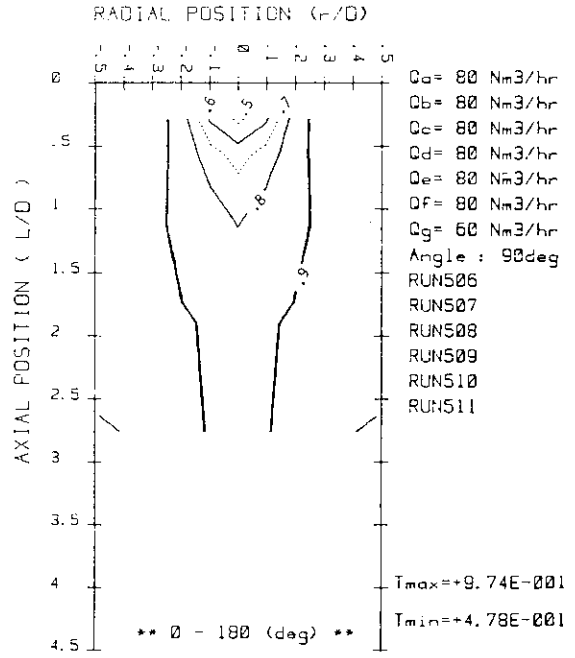


$W_R = 6$

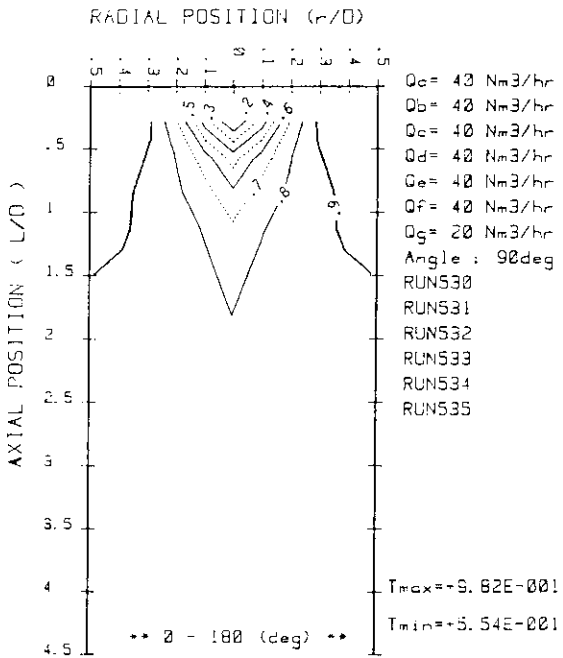
Fig.30 Temperature contours at the vertical cross-section of the test model ($W_R=4-22.5, 90^\circ$)



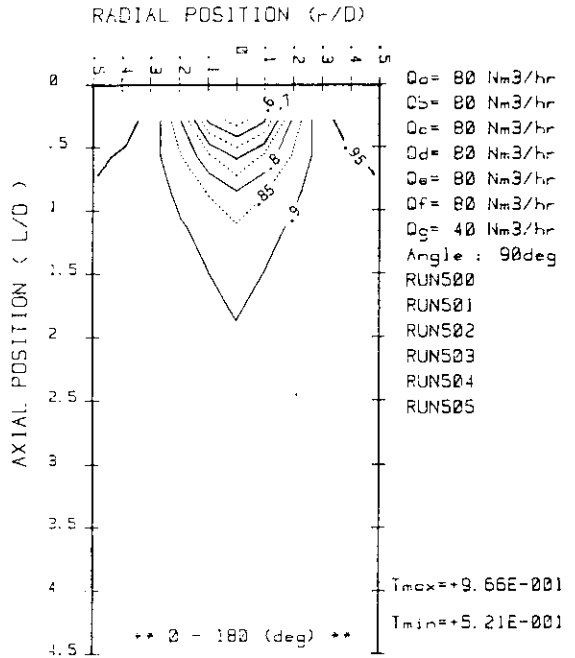
$W_R = 9$



$W_R = 8$

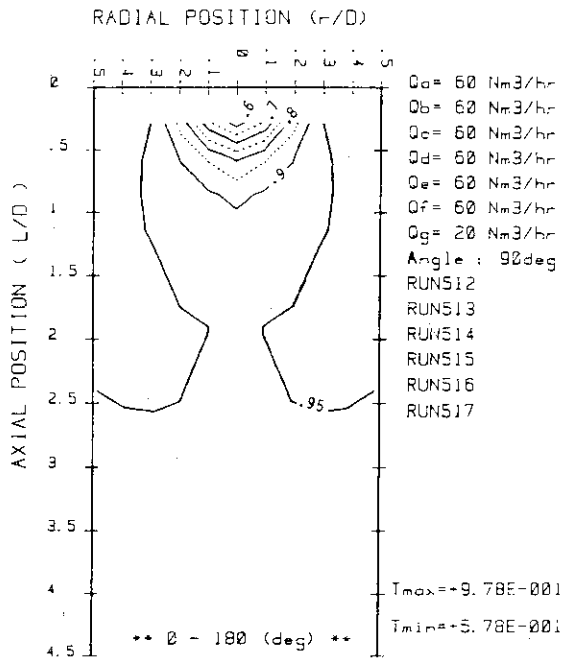


$W_R = 12$

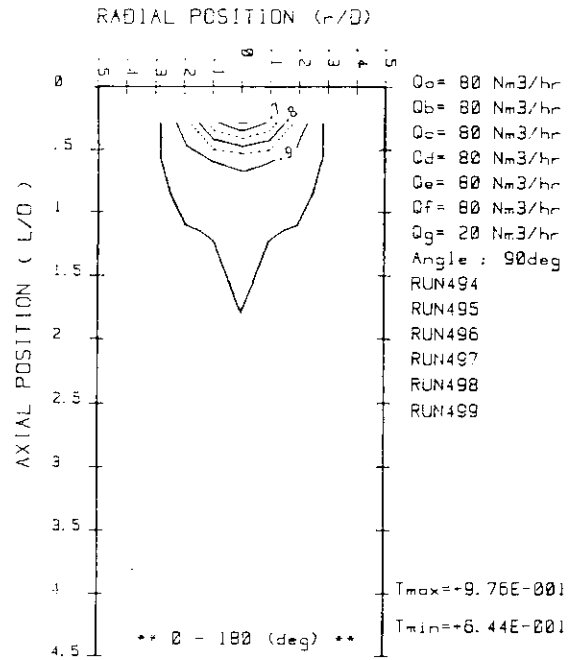


$W_R = 12$

Fig.30 (Continued)

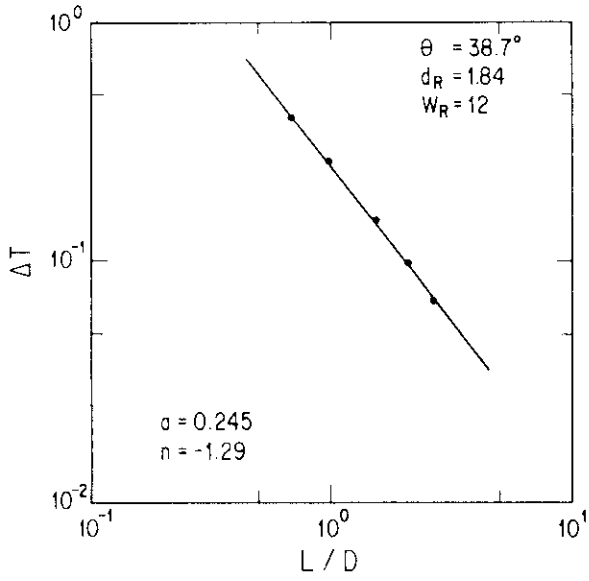


$W_R = 18$

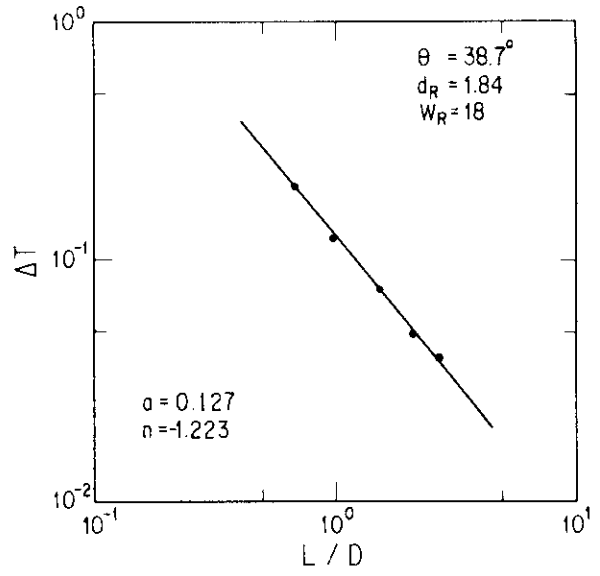


$W_R = 22.5$

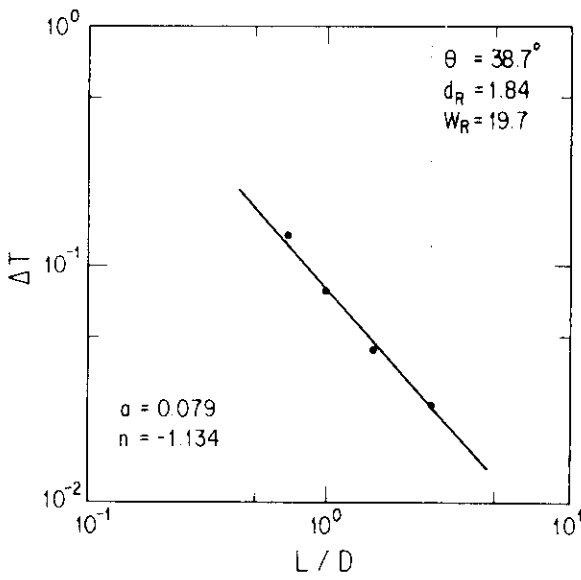
Fig.30 (Continued)



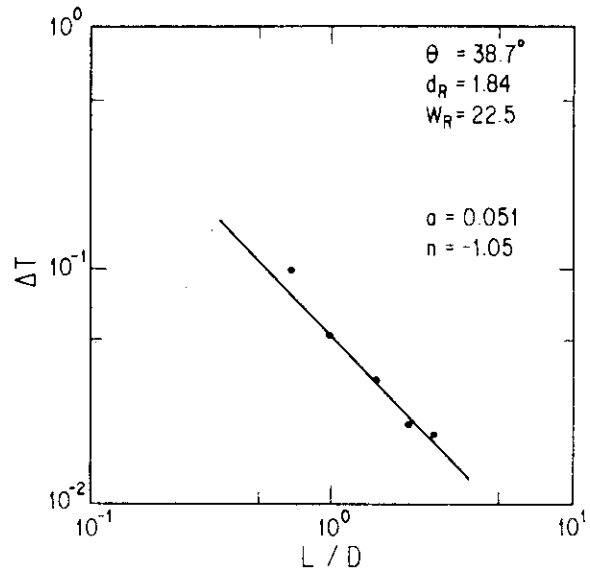
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.31 The decay of the maximum temperature differences towards the downstream direction

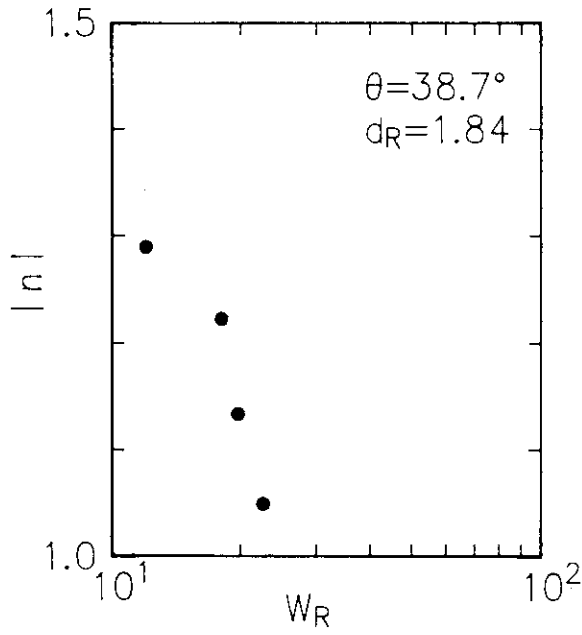


Fig.32 Relationship between the absolute value of the power (n) and the ratio of flow rate (W_R)

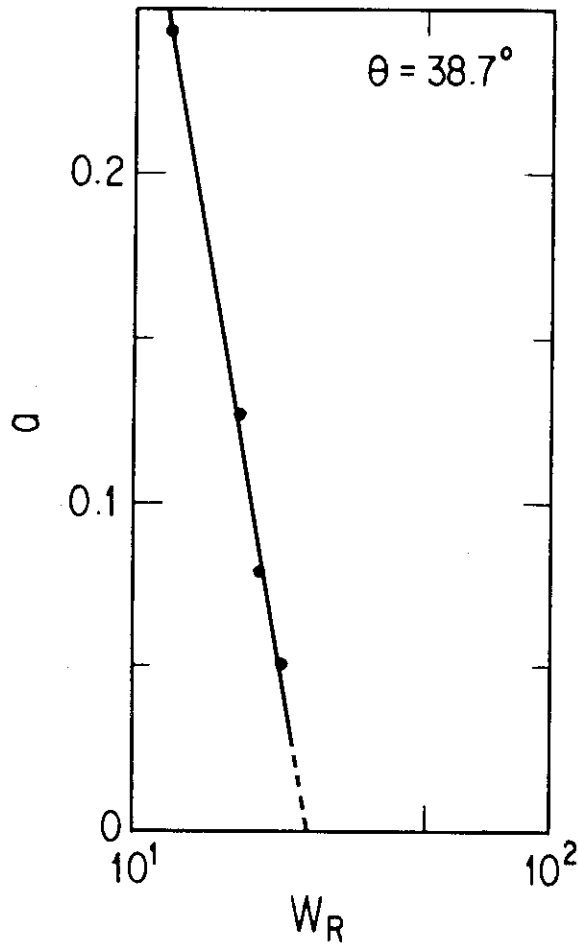
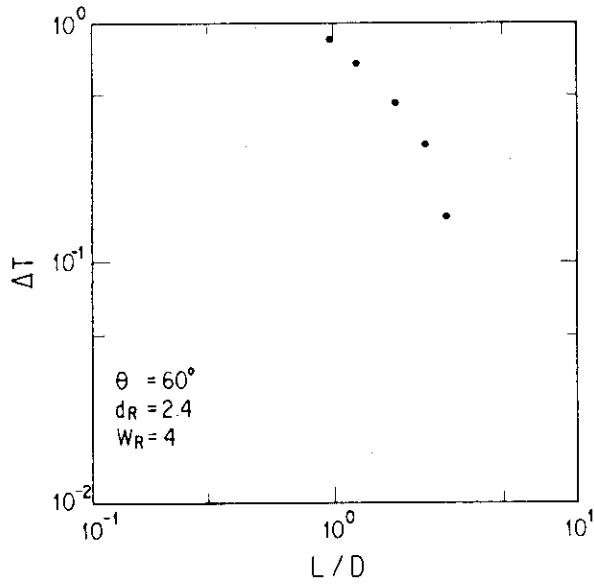
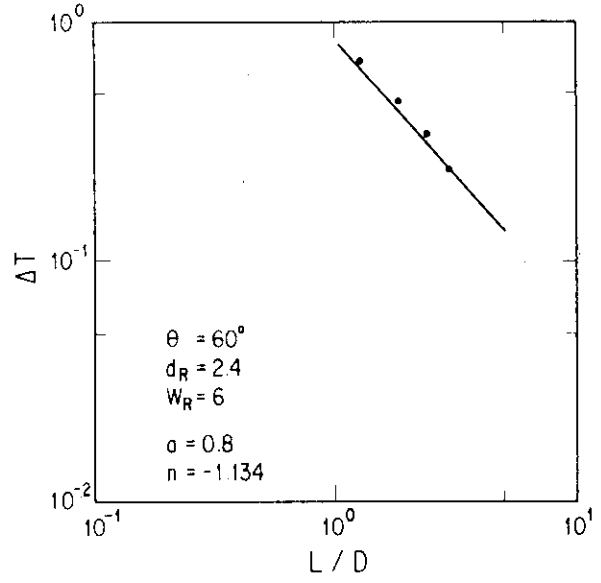


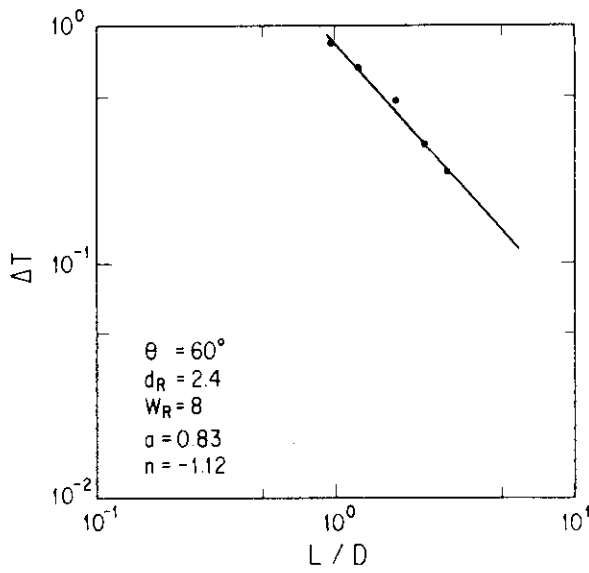
Fig.33 Relationship between coefficients (a) and the ratio of flow rate (W_R)



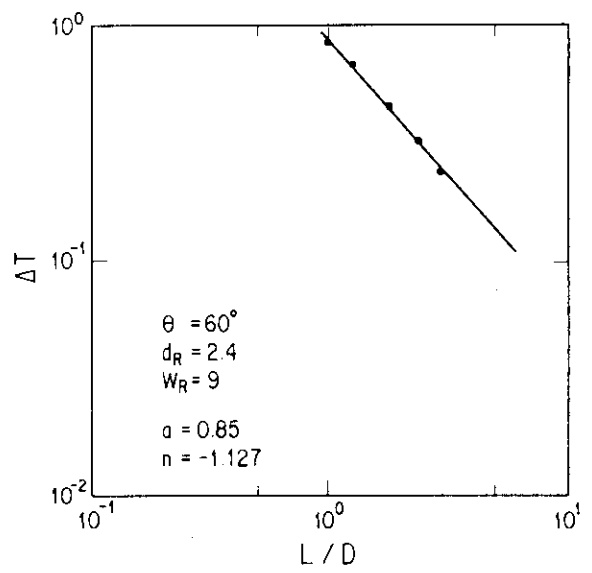
(a)



(b)

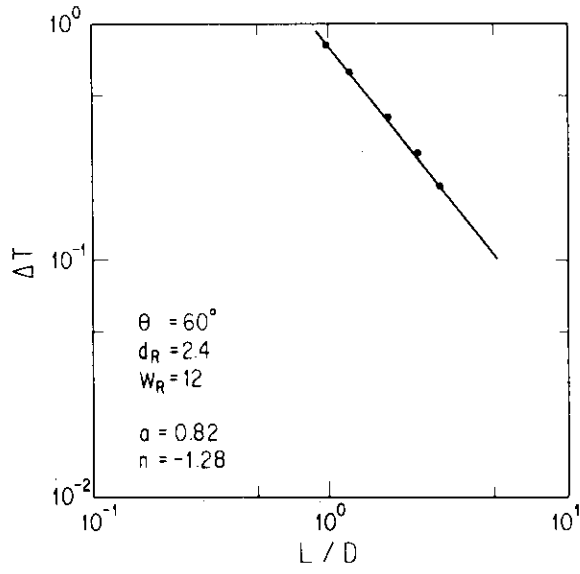


(c)

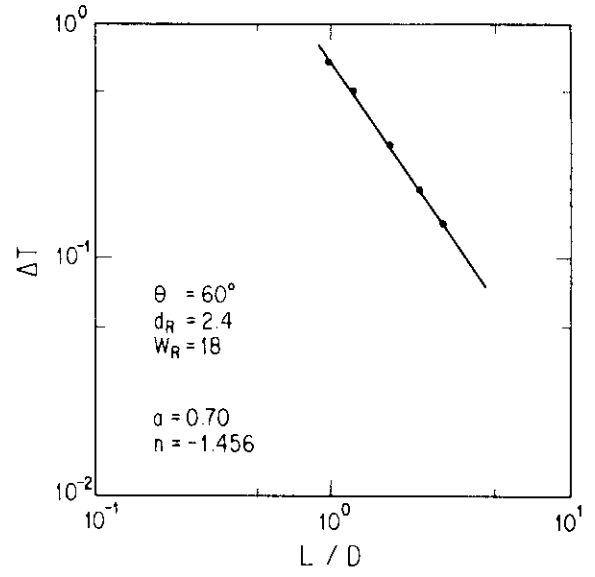


(d)

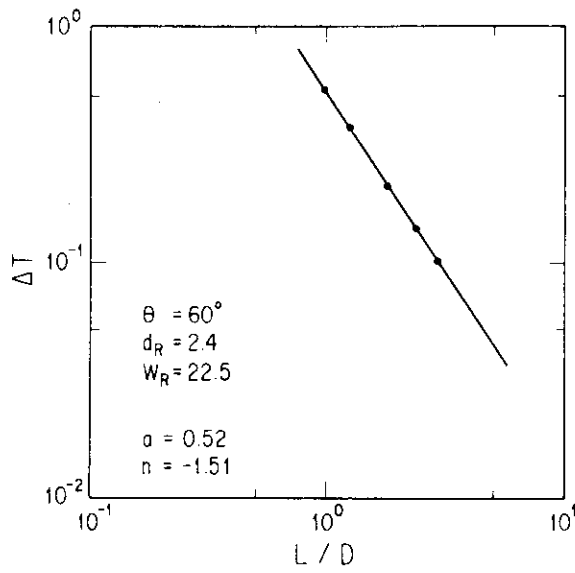
Fig.34 The decay of the maximum temperature differences towards the downstream direction



(e)



(f)



(g)

Fig.34 (Continued)

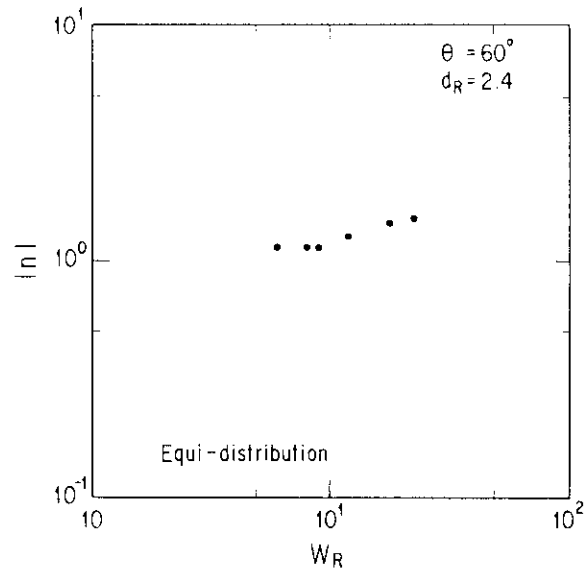
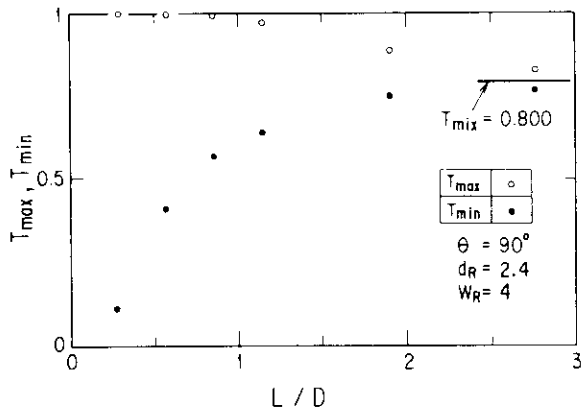
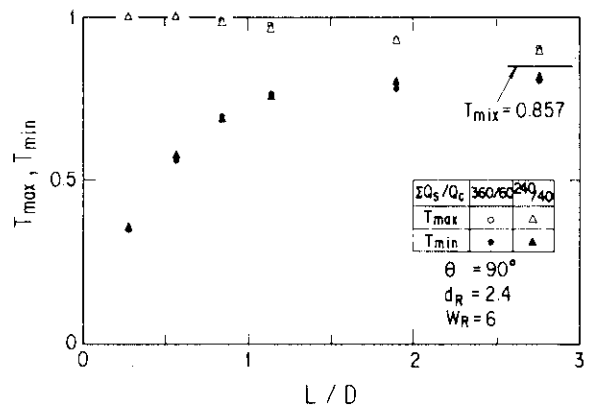


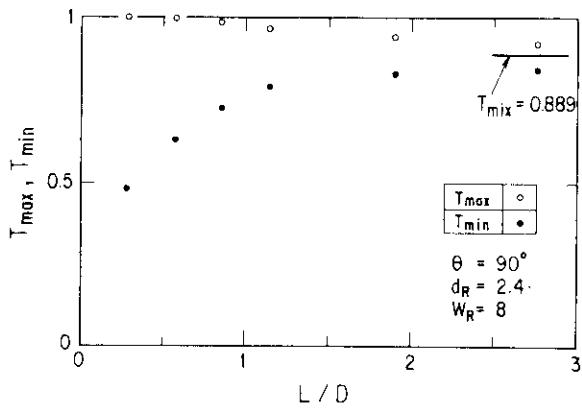
Fig.35 Relationship between the absolute value of the power (n) and the ratio of flow rate (W_R)



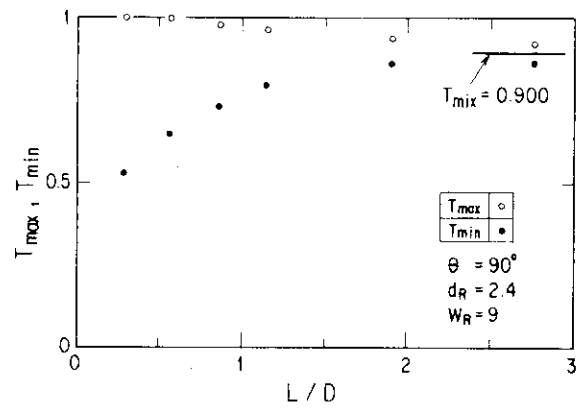
(a)



(b)

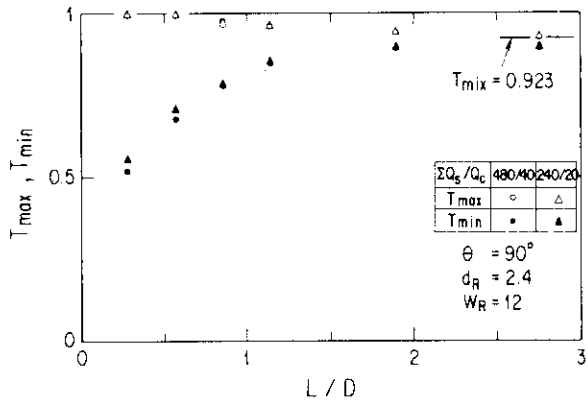


(c)

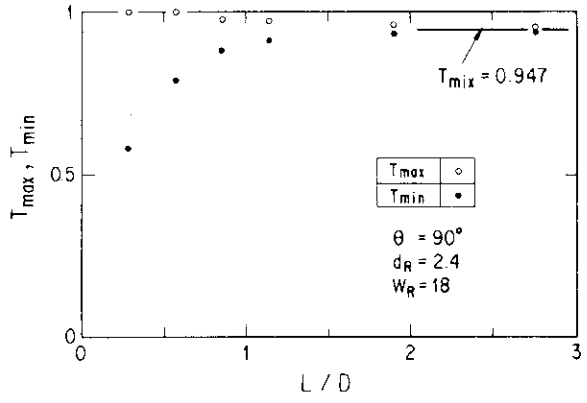


(d)

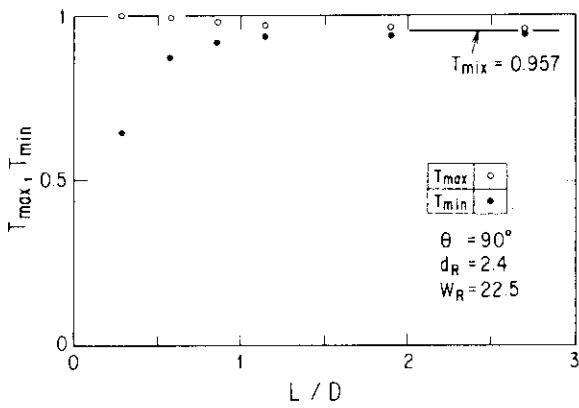
Fig.36 The change of the maximum and minimum temperature towards the downstream direction



(e)

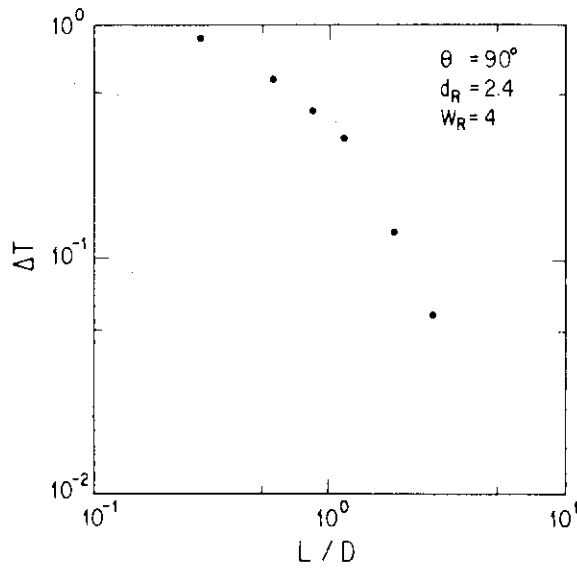


(f)

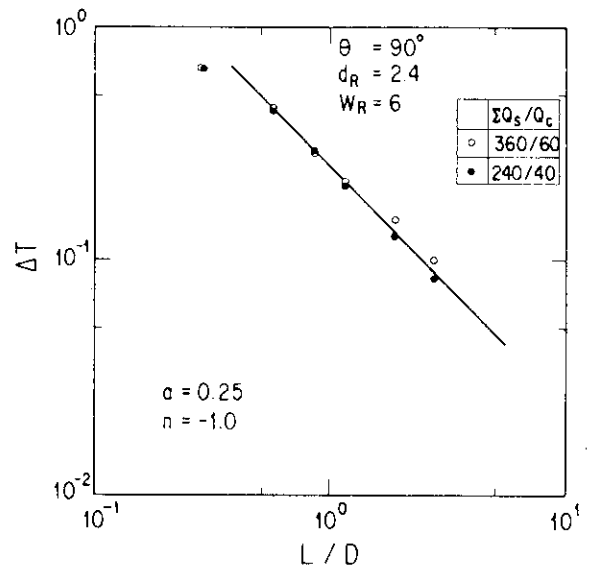


(g)

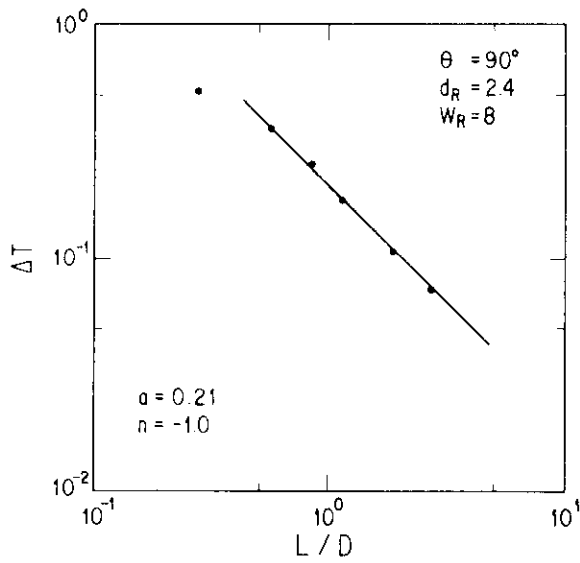
Fig.36 (Continued)



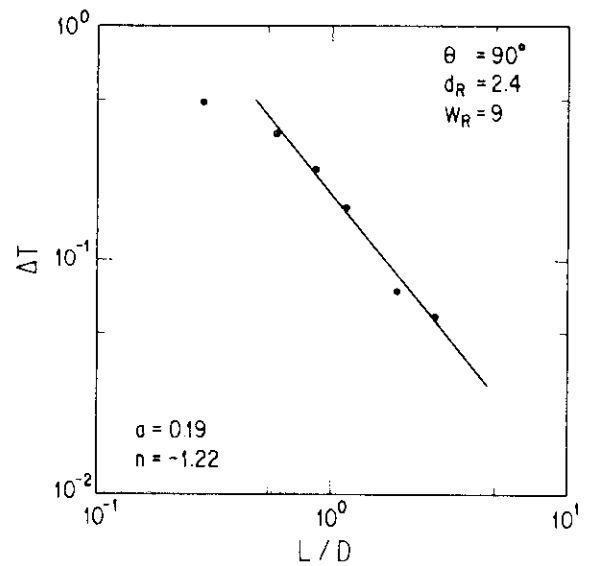
(a)



(b)

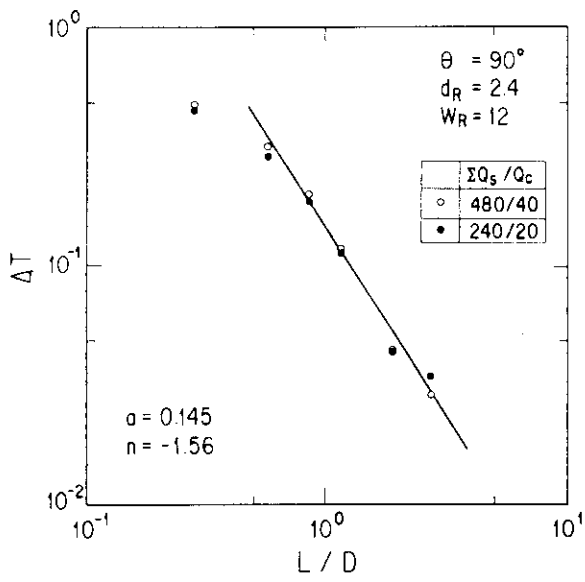


(c)

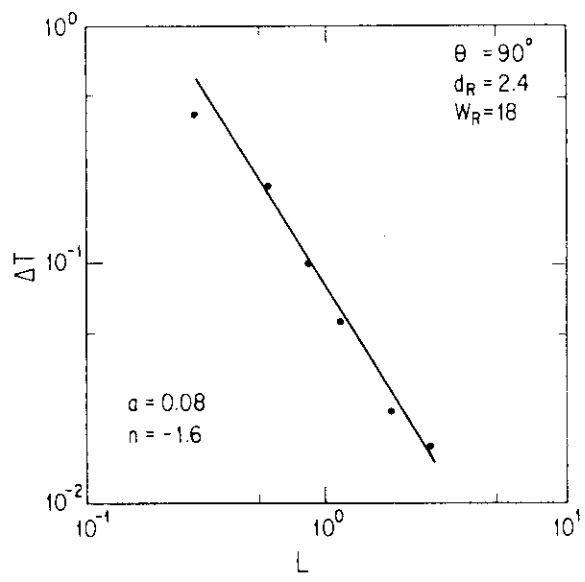


(d)

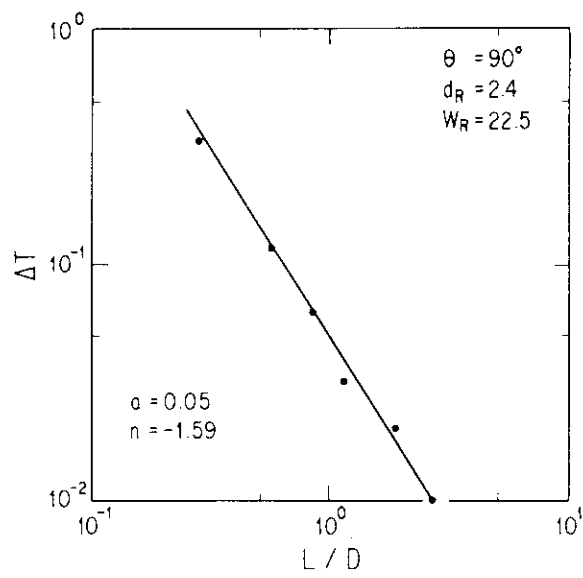
Fig.37 The decay of the maximum temperature differences towards the downstream direction



(e)



(f)



(g)

Fig.37 (Continued)

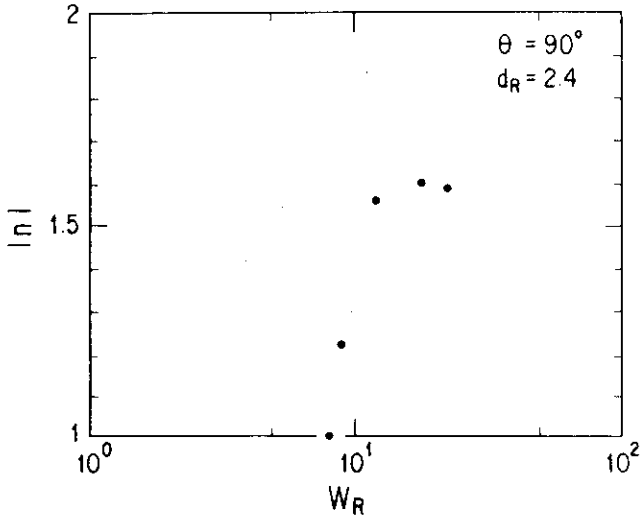


Fig.38 Relationship between the absolute value of the power (n) and the ratio of flow rate (W_R)

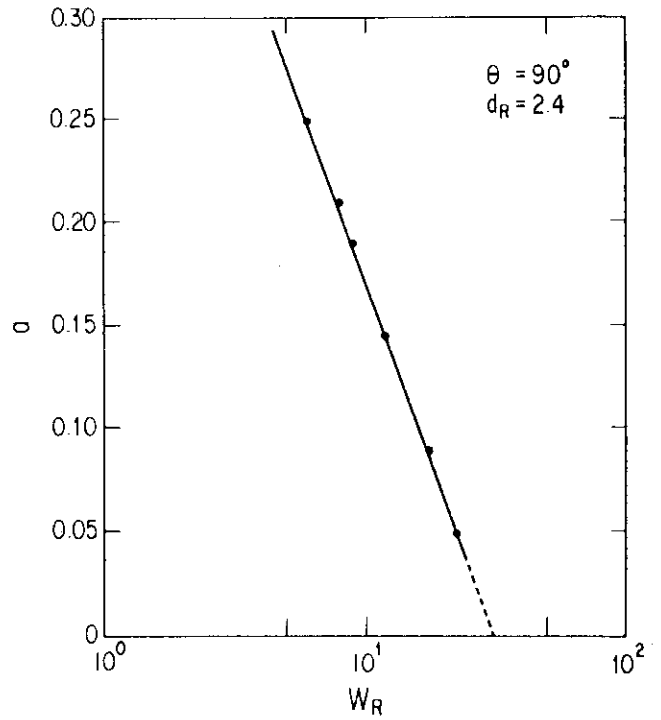


Fig.39 Relationship between coefficients (a) and the ratio of flow rate (W_R)

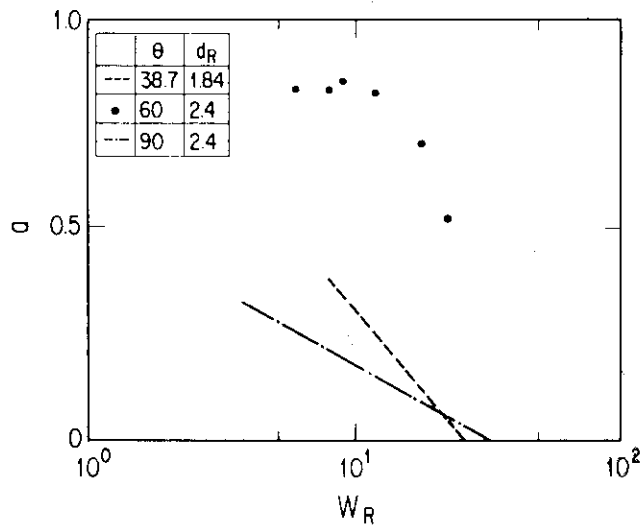


Fig.40 Thermal mixing characteristics of three test models for equi-distribution conditions

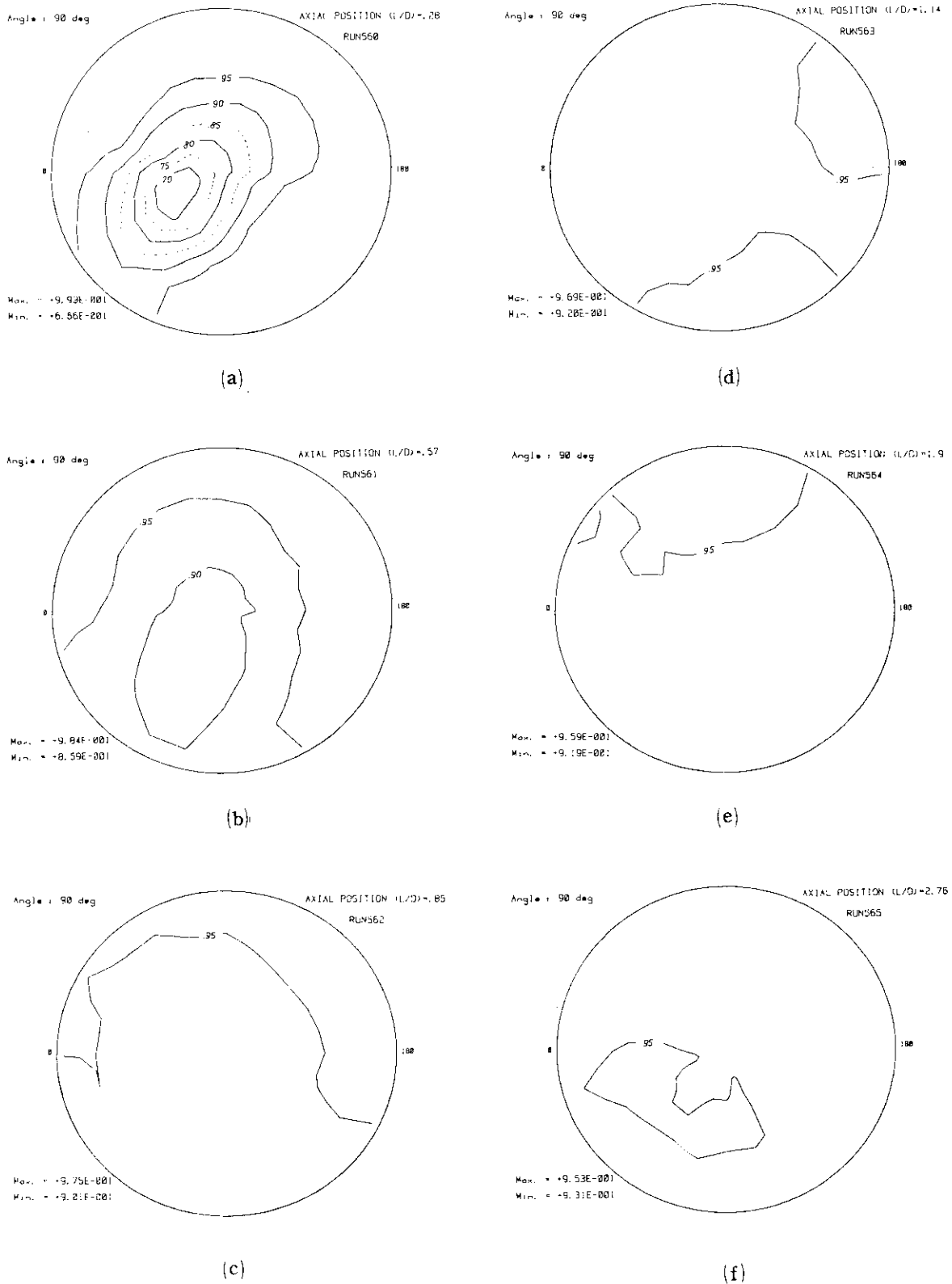


Fig.41 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type A-1)

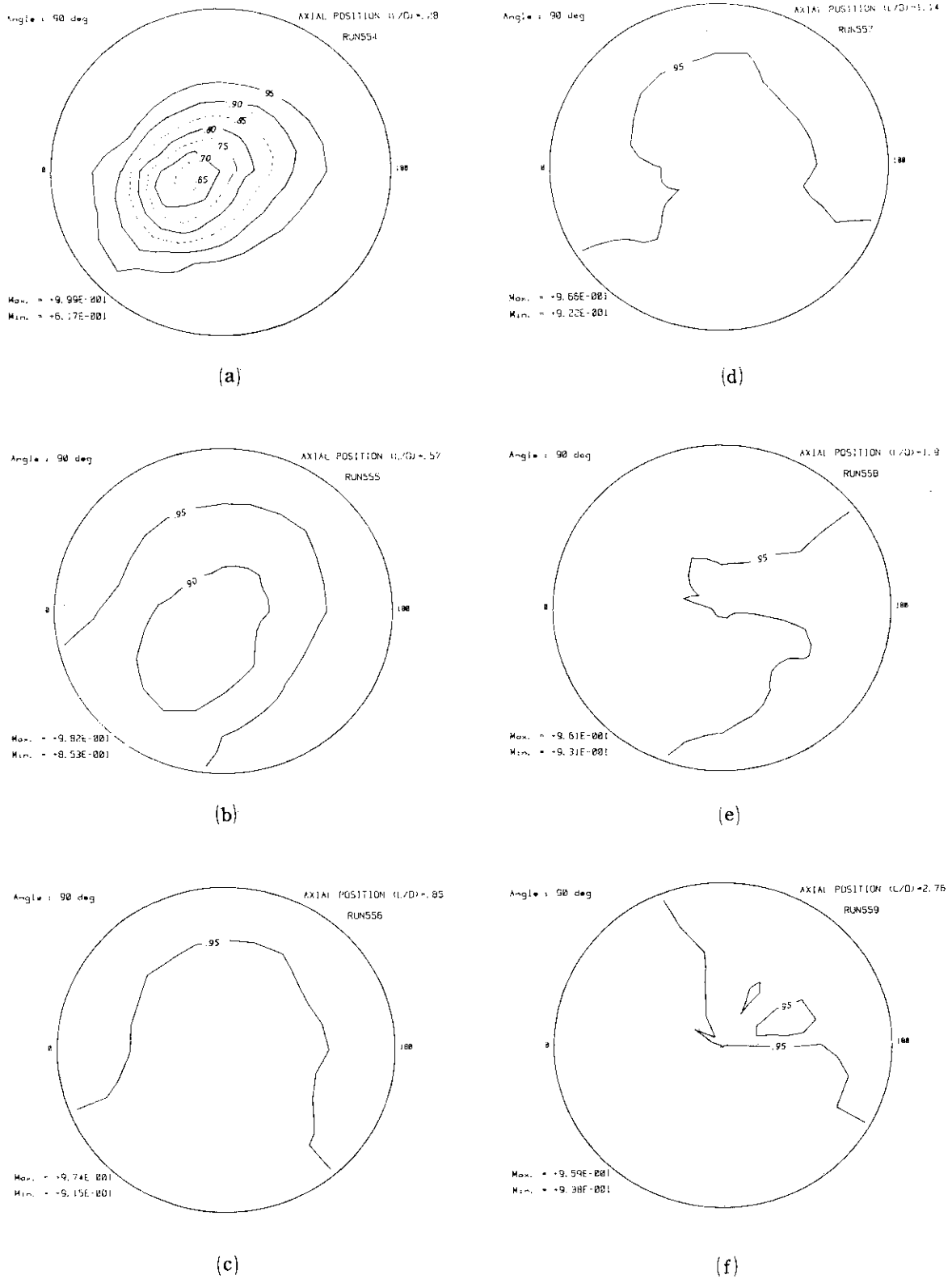


Fig.42 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type A-2)

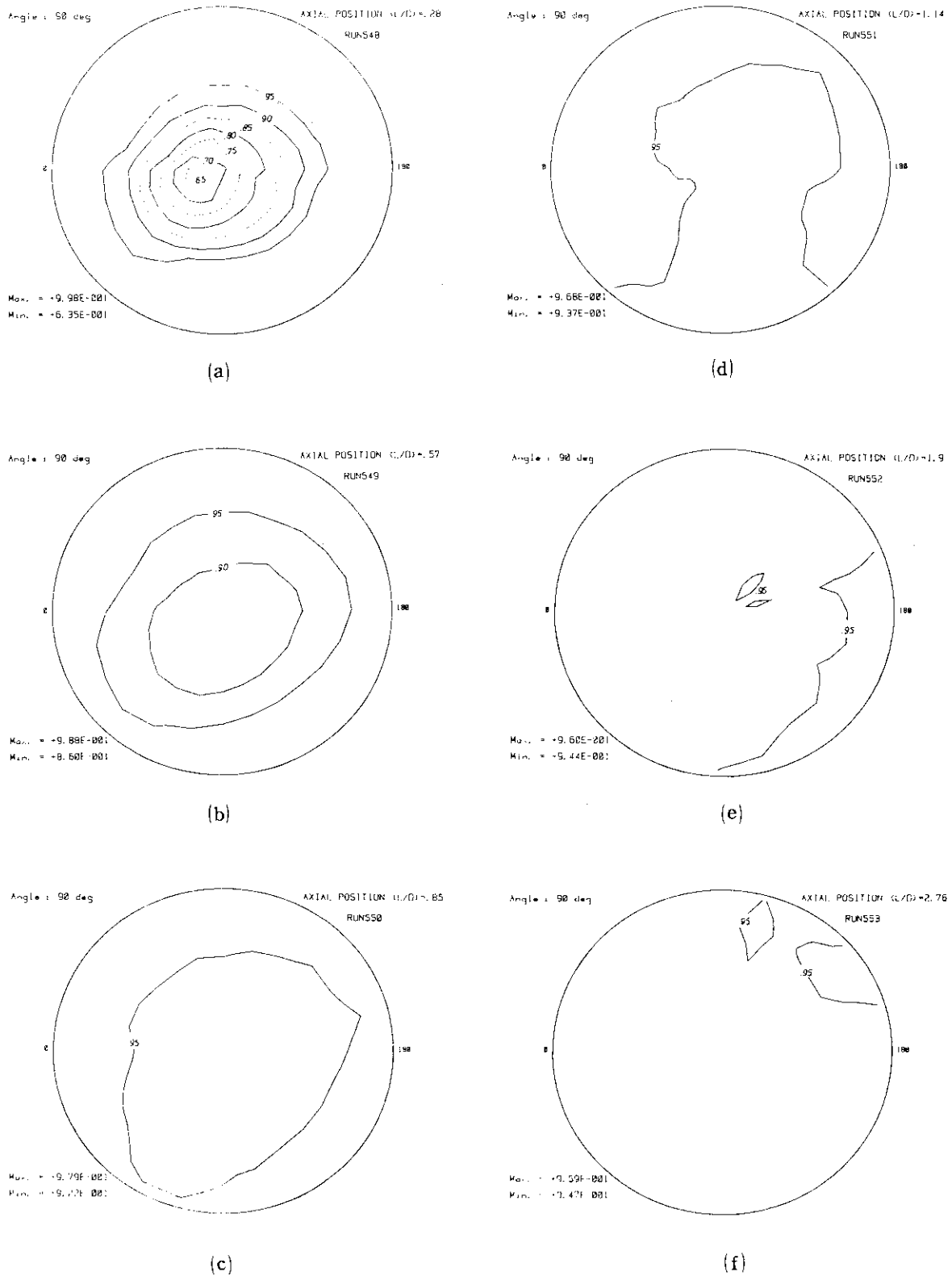
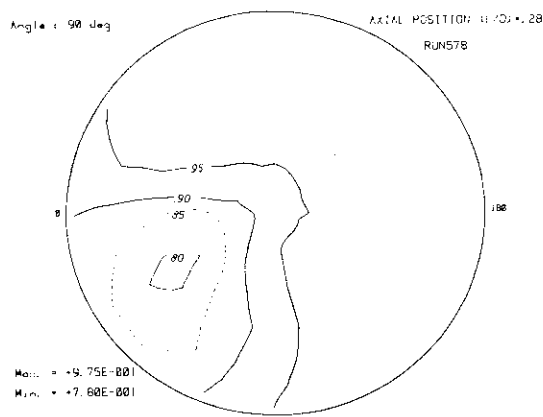
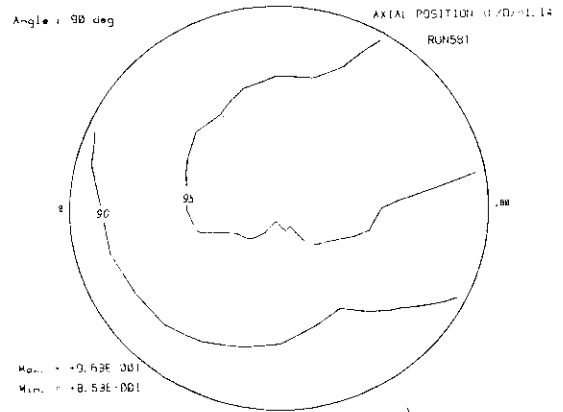


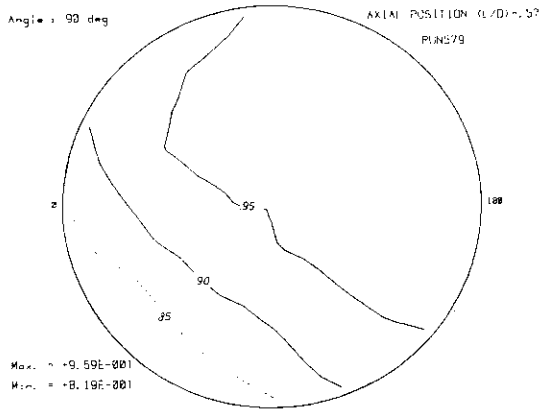
Fig.43 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type A-3)



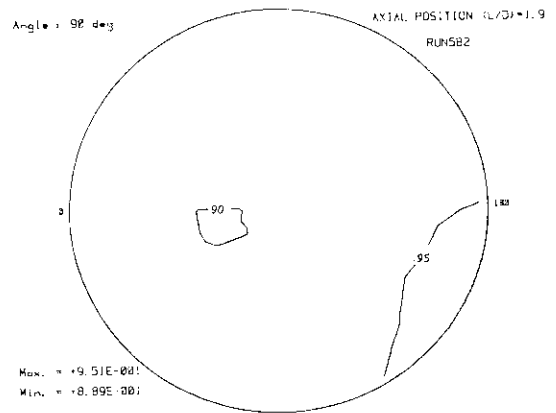
(a)



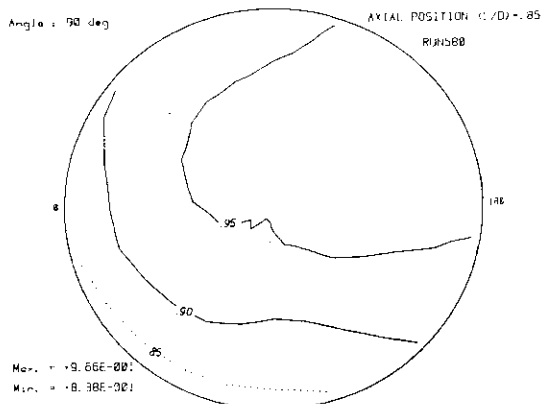
(d)



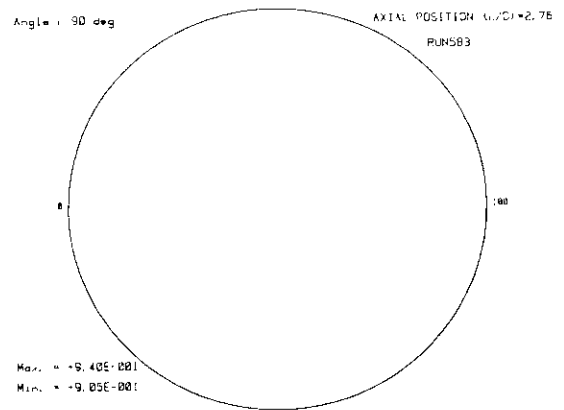
(b)



(e)



(c)



(f)

Fig.44 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type B-1)

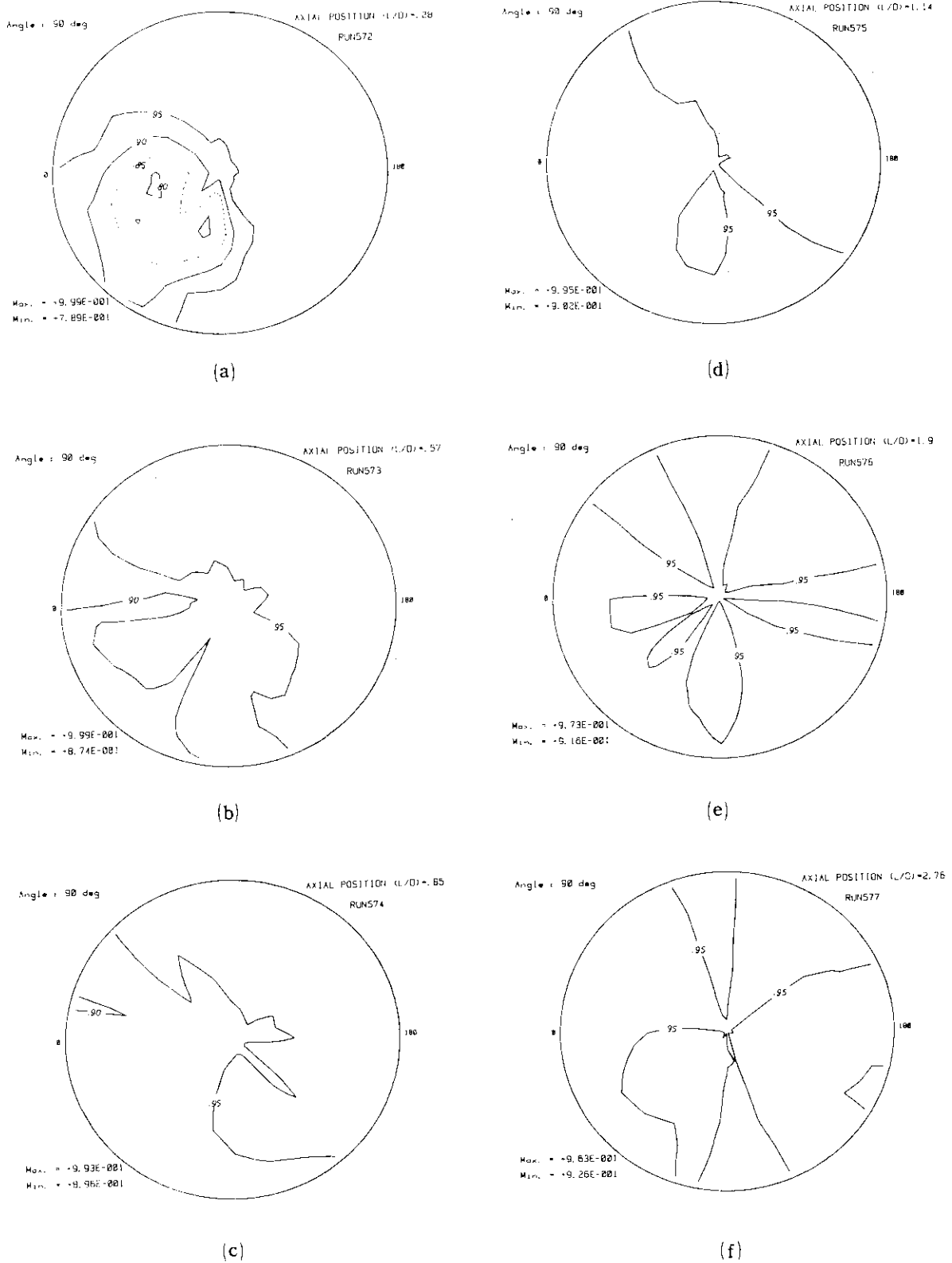


Fig.45 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type B-2)

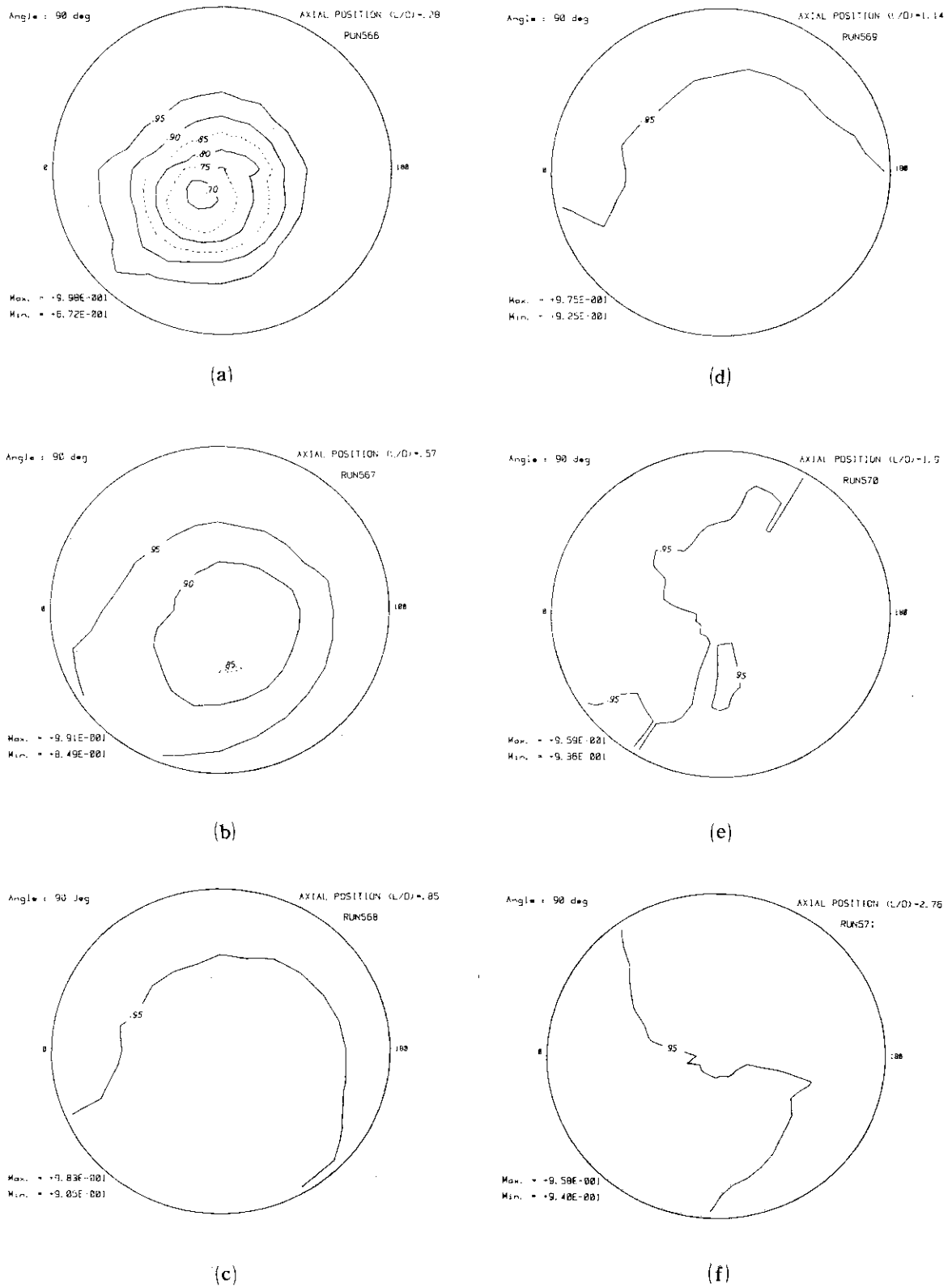


Fig.46 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type B-3)

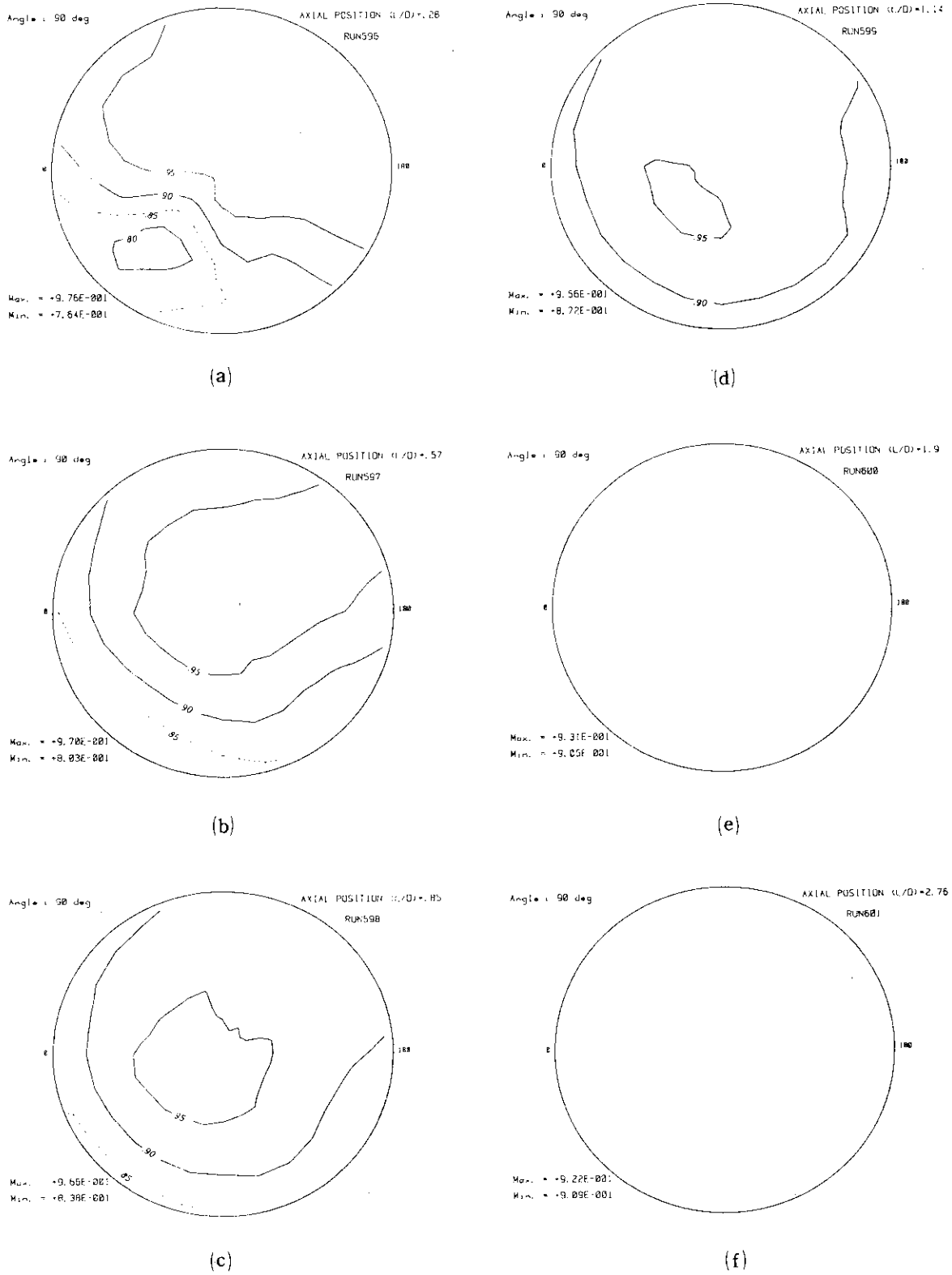


Fig.47 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type C-1)

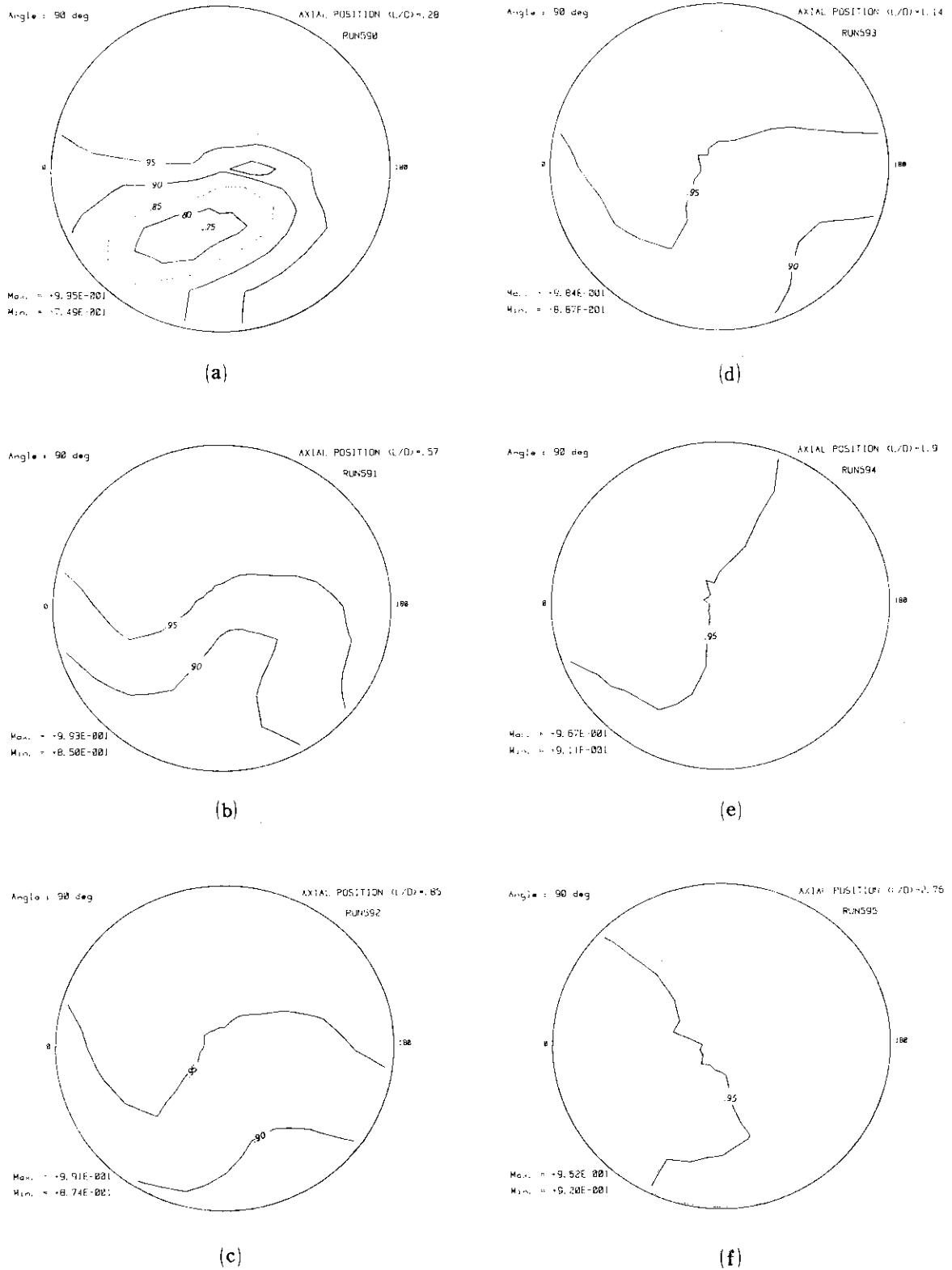


Fig.48 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type C-2)

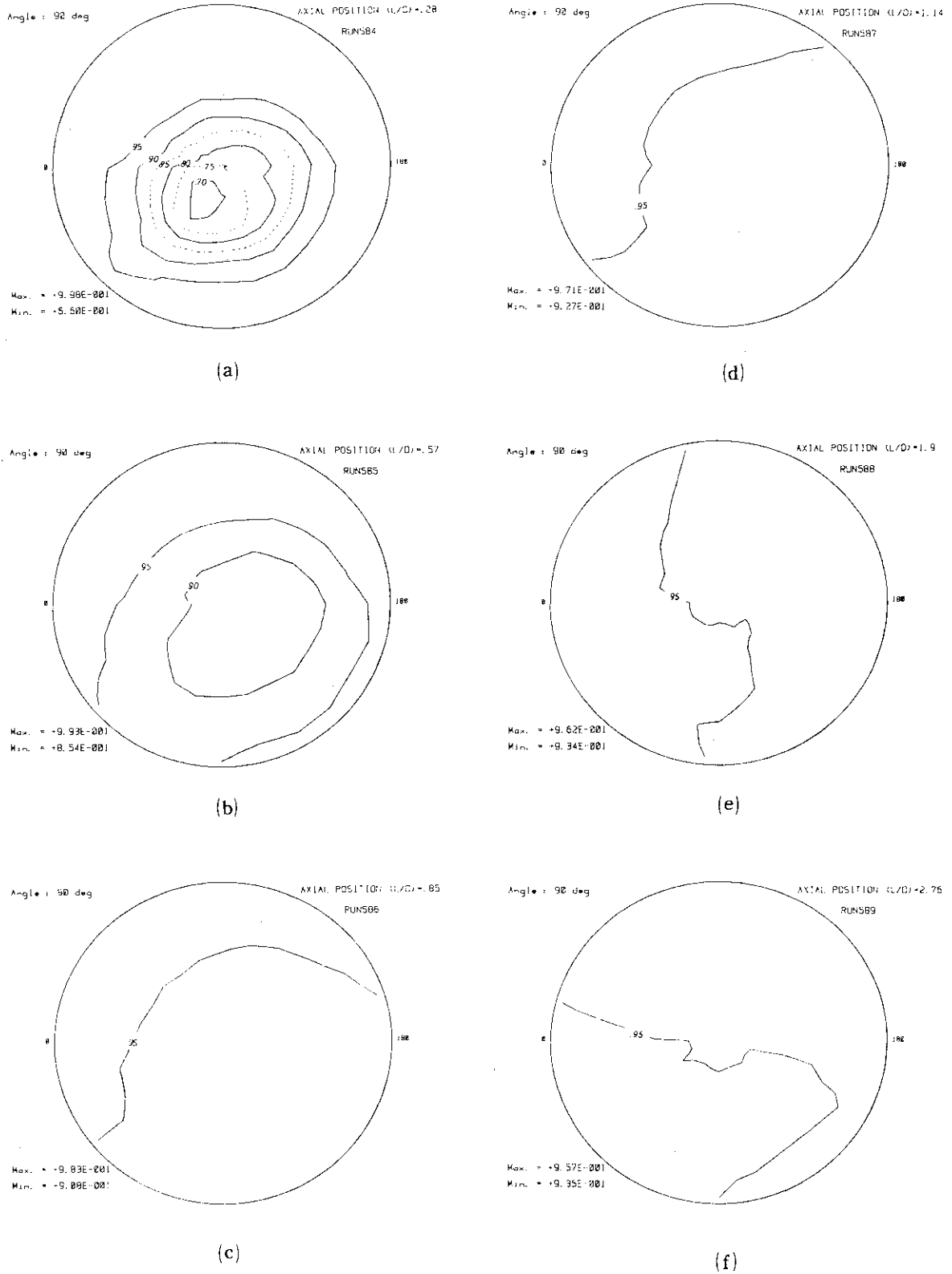
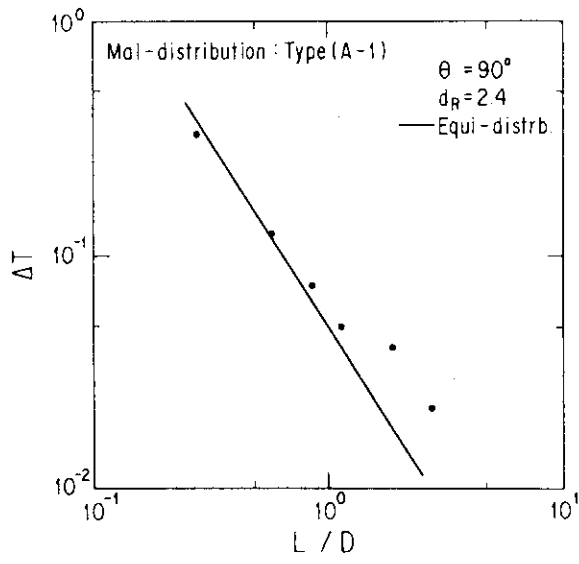
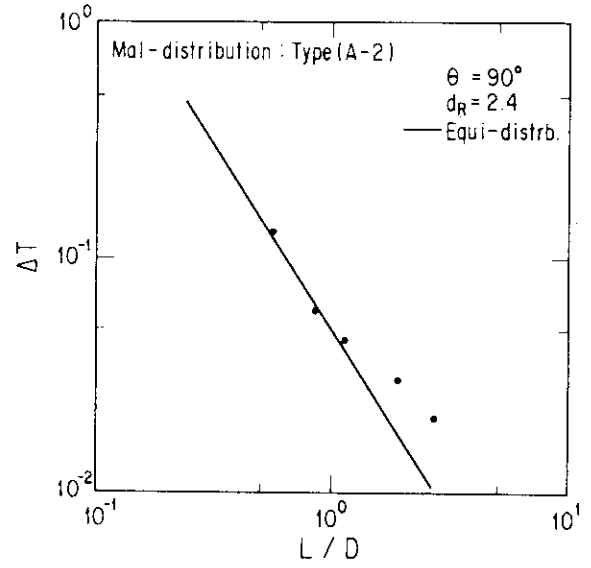


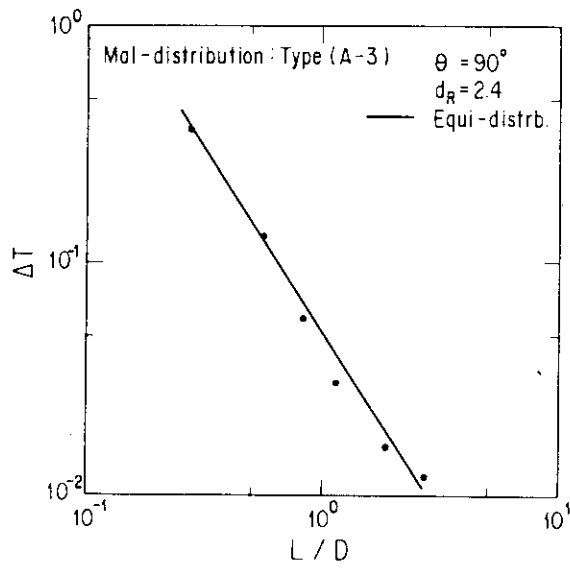
Fig.4.9 Temperature contours at the horizontal cross-section of the test model (Type C-3)



(a) A - 1

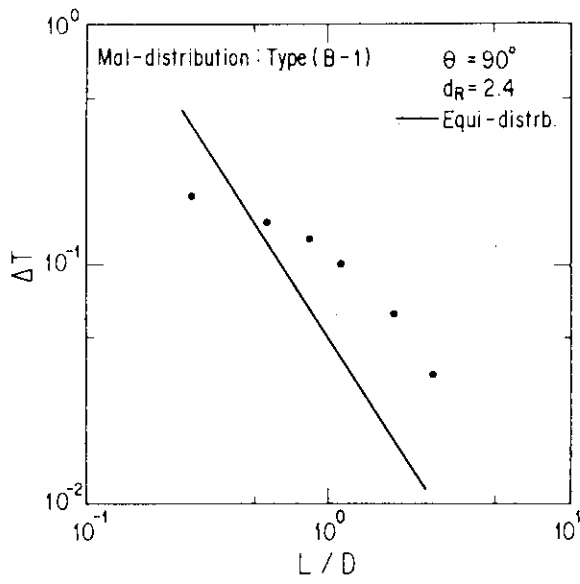


(b) A - 2

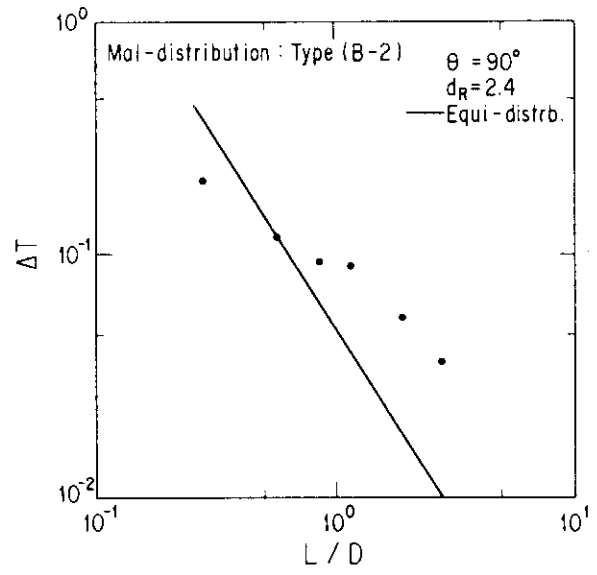


(c) A - 3

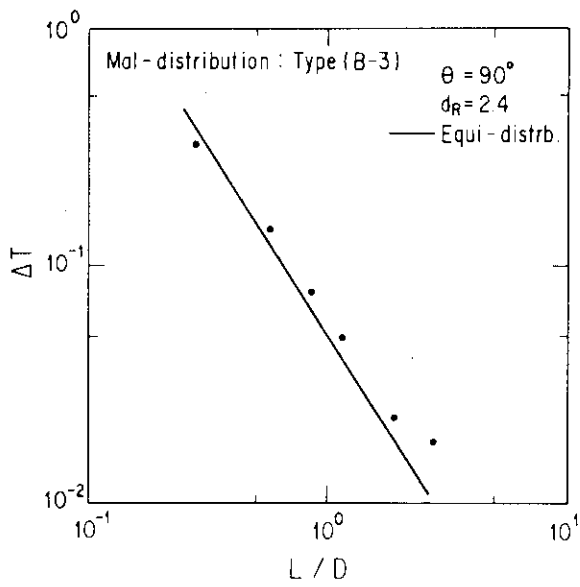
Fig.50 The decay of the maximum temperature differences towards the downstream direction (Type A, 90°)



(a) B - 1

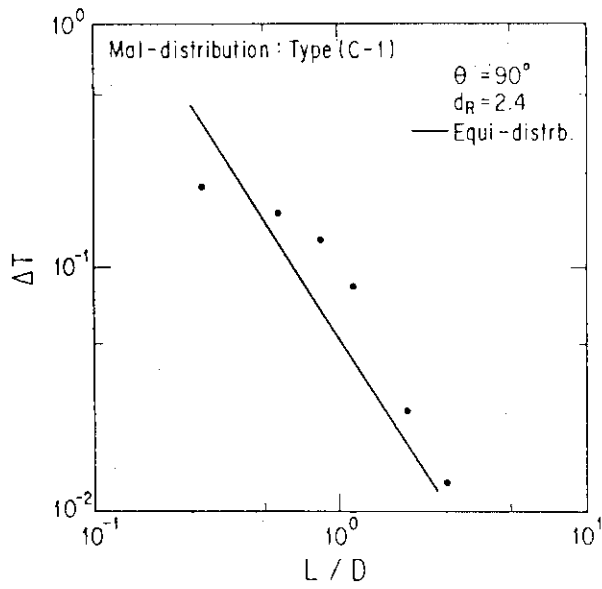


(b) B - 2

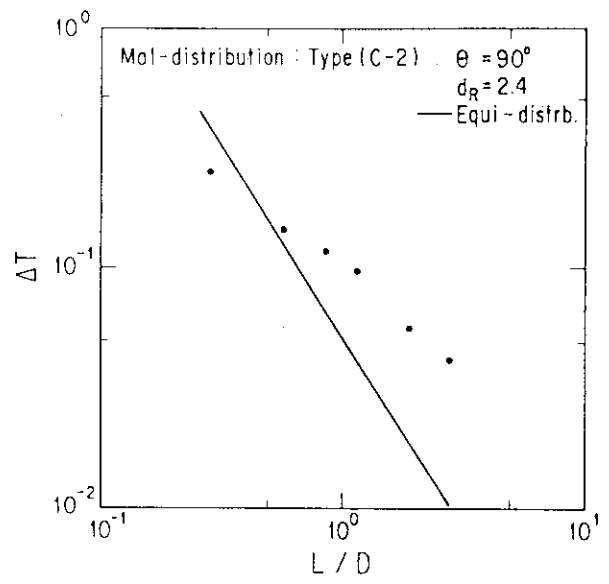


(c) B - 3

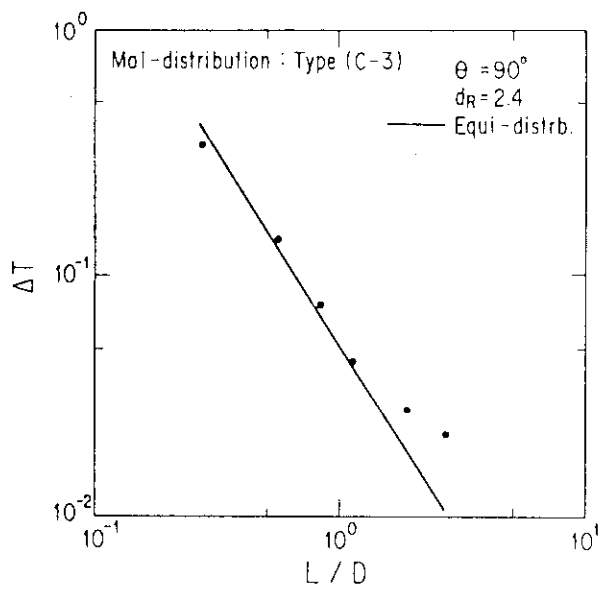
Fig.51 The decay of the maximum temperature differences towards the downstream direction (Type B, 90°)



(a) C - 1



(b) C - 2



(c) C - 3

Fig.52 The decay of the maximum temperature differences towards the downstream direction (Type C, 90°)