

J A E R I - M

90-044

高転換軽水炉限界熱流束実験 (3)

— 加熱長さ : 0.5~1.0m、P/D : 1.126~1.2、ロッド数 : 4~7 —

1990年3月

岩村 公道・大久保 努・末村 高幸
平賀富士夫・村尾 良夫

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

高転換軽水炉限界熱流束実験(3)

- 加熱長さ : 0.5 ~ 1.0 m, P/D : 1.126 ~ 1.2, ロッド数 : 4 ~ 7 -

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

岩村 公道・大久保 努・末村 高幸

平賀富士夫・村尾 良夫

(1990年2月3日受理)

高転換軽水炉の熱水力学的成立性研究の一環として、三角配列稠密格子バンドルでの定常及び流量低下非定常時の限界熱流束(CHF)実験を実施した。テスト部形状は、外径9.5 mm, ロッド本数: 4~7, ピッチとロッド径の比(P/D): 1.2~1.126, 及び発熱長さ: 0.5~1.0 mである。模擬燃料棒は、ステンレスチューブ製で、直流直接通電により軸方向一様加熱を行った。定常実験条件の範囲は、圧力: 1.0~3.9 MPa, 質量速度: 460~4270 kg/s.m², 出口クオリティ: 0.02~0.35である。非定常実験におけるCHF検出までの時間は、0.5~25.4秒である。

定常実験結果より、バンドル平均質量速度及びクオリティについて比較すると、4本ロッドの方が、7本ロッドよりもCHFが大きくなつた。また、発熱長さが短いほどCHFは大きくなり、P/Dが小さいほどCHFは低下した。サブチャンネル解析コードCOBRA-IV-Iにより求めた局所流動条件をCHF相関式の評価に用いた結果、定常CHFデータに関してはKfK相関式が20%以内で一致した。一方、WSC-2, EPRI-B&W, EPRI-Columbia及びKattoの相関式については、データとの一致は良好ではなかった。

流量低下時には、流速減少率が6%/s以下では、過渡時と定常時のDNB発生条件に差は認められなかつたが、流速減少率がさらに大きくなると、定常実験から予測されるDNB発生条件に達するよりも早くDNBに至る傾向が認められた。

Critical Heat Flux Experiments for High Conversion
Light Water Reactor (3)

- Heated length: 0.5~1.0m, P/D: 1.126~1.2, Number of rods: 4~7 -

Takamichi IWAMURA, Tsutomu OKUBO, Takayuki SUEMURA
Fujio HIRAGA, Yoshio MURAO

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

(Received February 3, 1990)

As a part of the thermal-hydraulic feasibility study of a high conversion light water reactor (HCLWR), critical heat flux (CHF) experiments were performed using triangular array rod bundles under steady-state and flow reduction transient conditions. The geometries of test sections were: rod outer diameter 9.5 mm, number of rods 4~7, heated length 0.5~1.0 m, and pitch to diameter ratio (P/D) 1.126~1.2. The simulated fuel rod was a stainless steel tube and uniformly heated electrically with direct current. In the steady-state tests, pressures ranged: 1.0~3.9 MPa, mass velocities: 460~4270 kg/s·m², and exit qualities: 0.02~0.35. In the transient tests, the times to CHF detection ranged from 0.5 to 25.4 s.

The steady-state CHF's for the 4-rod test sections were higher than those for the 7-rod test sections with respect to the bundle averaged flow conditions. The measured CHF's increased with decreasing the heated length and decreased with decreasing the P/D. Based on the local flow conditions obtained with the subchannel analysis code COBRA-IV-I, KfK correlation agreed with the CHF data within 20%, while WSC-2, EPRI-B&W, EPRI-Columbia and Katto correlations failed to give satisfactory agreements.

Under flow reduction rates less than 6%/s, no significant difference in the onset conditions of DNB (departure from nucleate boiling) was recognized between the steady-state and transient conditions. At flow

reduction rates higher than 6%/s, on the other hand, the DNB occurred earlier than the DNB time predicted with the steady-state experiments.

Keywords: High Conversion Light Water Reactor, Subchannel Analysis, Departure from Nucleate Boiling, Critical Heat Flux, Transient CHF, CHF Correlation, COBRA-IV-I Code, Mixing Coefficient, Thermal-Hydraulic Experiment, Reactor Safety

目 次

1. 序 論	1
2. 実 験	2
2.1 実験装置	2
2.2 定常限界熱流束実験	3
2.2.1 実験方法	3
2.2.2 実験条件	4
2.2.3 実験結果	4
2.3 流量低下非定常限界熱流束実験	4
2.3.1 実験方法	4
2.3.2 実験条件	5
2.3.3 実験結果	5
3. 実験結果の検討	30
3.1 バンドル平均値に基づく CHF相関式の評価	30
3.1.1 発熱長さ, P/D, ロッド本数の CHFに及ぼす効果	30
3.1.2 CHF相関式の予測精度	31
3.2 サブチャンネル解析結果に基づく CHF相関式の評価	32
3.2.1 COBRA-IV-I コードによるサブチャンネル解析	32
3.2.2 局所流動条件を用いた CHF相関式の予測精度	34
3.3 流量低下時の CHF特性	35
4. 結 論	70
謝 辞	70
参考文献	71
付録A 定常CHF実験データ	73
付録B 流量低下 CHF実験データ	88
付録C CHF相関式	97
付録D COBRA-IV-I コードによるサブチャンネル解析結果	107

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 Experimental Apparatus	2
2.2 Steady-State CHF Experiments	3
2.2.1 Test Procedure	3
2.2.2 Test Conditions	4
2.2.3 Test Results	4
2.3 Flow Reduction Transient CHF Experiments	4
2.3.1 Test Procedure	4
2.3.2 Test Conditions	5
2.3.3 Test Results	5
3. Discussions	30
3.1 Evaluation of CHF Correlations Based on Bundle Averaged Conditions	30
3.1.1 Effect of Heated Length, P/D, and number of Rods on CHF	30
3.1.2 Predictive Capability of CHF Correlations	31
3.2 Evaluation of CHF Correlations Based on Subchannel Analysis Results	32
3.2.1 Subchannel Analysis with COBRA-IV-I Code	32
3.2.2 Predictive Capability of CHF Correlations Using Local Flow Conditions	34
3.3 CHF Characteristics under Flow Reduction Conditions	35
4. Conclusions	70
Acknowledgment	70
References	71
Appendix A Steady-State CHF Data	73
Appendix B Flow Reduction Transient CHF Data	88
Appendix C CHF Correlations	97
Appendix D Subchannel Analysis Results with COBRA-IV-I Code	107

1. 序論

軽水炉利用の長期化を背景として、天然ウラン資源及びプルトニウムの有効利用をはかるため、高転換軽水炉（HCLWR）の設計研究が、日本、西ドイツ、フランス等の各国で進展している。原研でも昭和 60 年度から高転換軽水炉の予備的な検討を開始し、概念の成立性を調べるための炉物理的及び熱水力学的研究を進めている^{(1)～(5)}。

高転換軽水炉では、転換比（親物質が単位時間に中性子を捕獲して生じる核分裂物質の量に対する消滅する核分裂物質の量の比）を高めるため、減速材と燃料の体積比 (V_m/V_f) を小さくして中性子スペクトルを硬化させる必要がある。このため、高転換軽水炉の設計では、燃料棒は三角配列とし、燃料棒の間隔を狭くした稠密格子炉心が一般に採用されている。

高転換軽水炉の経済性を向上させるためには、炉心から取り出す熱出力をできるだけ高めることが要求される。しかしながら、原子炉出力を増大していくと、燃料棒表面での伝熱形態が除熱能力の高い核沸騰状態から離脱（departure from nucleate boiling : DNB）し、除熱能力の低い遷移沸騰状態に推移することにより、燃料棒表面温度が上昇し、燃料破損に至る可能性がある。そこで、DNBが生じる熱流束と燃料棒の局所熱流束との比を限界熱流束比（DNBR）と定義し、設計上、炉心内のすべての位置でのDNBRを評価し、DNBRの最小値（即ち、最小限界熱流束比）がある値以上であるようにする。一般に、統計的に、95 %の確率で核沸騰状態が保たれることを 95 % の信頼度で言えるように、最小限界熱流束比の下限を設定している。なお、実験的には、出力を増加させていき、核沸騰状態が維持できなくなり、表面温度が大きく変化し始める熱流束を限界熱流束（CHF）と称しているが、設計上はこれを DNB の生じる熱流束とみなし、CHF を用いて DNB を評価している。DNBR は上述のように、原子炉の最大熱出力を規定するファクターなので、高転換軽水炉の熱水力設計を進める上で、DNB 特性を明らかにすることが重要となる。

原研では、昭和 62 年度より、高転換軽水炉を対象とした CHF 実験を実施してきた^{(6),(7)}。その結果、高転換軽水炉の CHF 予測式としては、KfK 相関式⁽⁸⁾、EPRI-B&W 相関式⁽⁹⁾及び EPRI-Columbia 相関式⁽¹⁰⁾が有望であることを明らかにした。またこれとは別に、最高圧力が 13.8 MPa で 20 本バンドルからなる Bettis 原子力研究所の CHF 実験⁽¹¹⁾に対して、以上の 3 相関式の予測精度の評価を実施し、KfK 相関式の予測精度は 20 % 程度であることを示した⁽⁵⁾。

従来の原研での実験では、ロッド本数が 4 本であったが、その後実験に使用する過渡沸騰試験装置の改造を行い、ロッド本数が 7 本のテスト部での実験を可能とした。本装置を用いて、ロッド本数、ピッチ／ロッド径 (P/D) 及び発熱長さを変化させた 4 種類のテスト部による定常及び非定常時の CHF 実験を実施した。

本報では、以上の実験結果及び CHF 相関式の評価結果について報告する。

2. 実験

2.1 実験装置

限界熱流束実験は Fig. 2.1 に示す過渡沸騰試験装置を用いて実施した。本装置は、循環ポンプ（揚程 100 m），流量計，流量調節弁，テスト部，気水分離器，加圧器，蒸気凝縮器及び冷却器から構成されている。テスト部の加熱電源は直流 500 KW（最大 50 V, 10000 A）で、最高使用圧力は 4.0 MPa である。

本実験では以下に示す 4 種類のテスト部（A, B, C, D）を用いた。

テスト部	ロッド本数	ロッド径 (mm)	P/D	発熱長さ (m)
A	4	9.5	1.2	1.0
B	7	9.5	1.2	1.0
C	7	9.5	1.126	0.5
D	4	9.5	1.2	0.5

なお、7 本テスト部では、常に中心ロッドで DNB が発生するように、中心ロッドの出力を周辺ロッドよりも約 20 % 高くした。4 本テスト部では全ロッドを同一出力とした。

各テスト部の断面形状と DNB 検出用熱電対取り付け位置及びグリッドスペーサ取り付け位置を Fig. 2.2(a)～(d) に示す。また、テスト部容器の構造を Fig. 2.3(a)～(c) に示し、ヒーターロッドの構造を Fig. 2.4 に示す。ヒーターロッドは、外径 9.5 mm の SUS304 製チューブで、直接通電により軸方向一様加熱を行った。ロッド本数はテスト部 A と D が 4 本で、テスト部 B と C が 7 本である。発熱長さはテスト部 A, B が 1.0 m で、テスト部 C, D が 0.5 m である。配列ピッチはテスト部 C が 10.7 mm ($P/D = 1.123$) で、その他のテスト部は 11.4 mm ($P/D = 1.2$) である。Table 2.1 に、各テスト部の流路断面積、熱的及び水力等価直径などの幾何学的形状データを示す。

以上 4 種類のテスト部による実験結果を比較することにより、以下の効果を調べることができる。

- テスト部 A, D 発熱長さの効果
- テスト部 A, B ロッド本数及び非発熱壁の効果
- テスト部 B, C, D 配列ピッチと発熱長さの複合効果

ロッドバンドルは、容器との電気絶縁のため、セラミックス製流路に収納した。セラミックス製流路は軸方向に 6 分割し、各流路の間にはロッドバンドルを保持するためのグリッドスペーサをはさんだ。セラミックス製流路の形状を、Fig. 2.5(a)～(d) に示す。この流路は SUS304 製流路外筒支持管に収納し、テスト部容器に固定した。使用したグリッドスペーサは六角形状で、各ロッドは 3 個所のバネで支持されている。各テスト部のグリッドスペーサ形状を Fig. 2.6(a)～(c) に示す。スペーサ高さは、4 本ロッド用が 13 mm で、7 本ロッド用が 20 mm である。スペーサの垂直方向取り付け位置は Fig. 2.2(a)～(d) に示してある。

各ヒーターロッドには、Fig. 2.2 に示す位置に、外径 0.5 mm の C-A 非接地型熱電対を内部より挿入し、外面を溶接した。取り付け方法は Fig. 2.4 に示す。バーンアウトによるテスト部の損傷を防止するため、ヒーターロッド熱電対信号が設定値を越えると、加熱電源を自動的に遮断するバーンアウト検出器を 3 台設置した。

測定項目としては、ヒーターロッド温度、テスト部入口及び出口温度、テスト部差圧、流量、テスト部加熱電圧・電流、及び気水分離器圧力である。このうち、気水分離器圧力は精密圧力計により直接測定し、その他の測定量は、直流増幅器により 1 ~ 5 V の電圧信号に変換し、データ集録装置（岩通製プログラマブルデータロガー SY-8503）にて集録した。テスト部差圧の計測位置については Fig. 2.7 に示す。但し、テスト部 Aにおいては差圧測定は行わなかった。

2.2 定常限界熱流束実験

2.2.1 実験方法

定常限界熱流束実験においては、系圧力、入口流量及び入口温度を一定に保持した状態で、テスト部加熱電圧をステップ状にゆっくり上昇させ、DNB を発生させた。DNB の発生は、ヒーターロッド表面に埋め込んだ熱電対が急激な温度上昇を示すことにより検出した。DNB 発生後はテスト部保護のため、加熱電力を自動的に遮断した。電力遮断信号を出力するヒーターロッド温度の設定値は、DNB 発生直前のヒーターロッド温度より約 20 °C 高く設定した。

DNB 発生直前のヒーターロッド温度の軸方向温度分布はほぼ一様なので、限界熱流束 (CHF) は次式で与えられる。

$$CHF = F_p F_h V I / (n_r \pi D L) \quad (1)$$

ここで、 $CHF = \text{限界熱流束 (W/m}^2\text{)}$

F_p = ホットロッド出力とバンドル平均出力の比

F_h = テスト部有効発熱量と総電力量の比

V = テスト部加熱電圧 (V)

I = テスト部加熱電流 (A)

n_r = ロッド本数

D = ヒーターロッド外径 (m)

L = 有効発熱長さ (m)

DNB 発生時のバンドル平均質量速度は、タービン流量計で測定した体積流量に、テスト部容器入口配管の水温データに対応する水の密度を乗じて得られた質量流量を、各テスト部の流路断面積で割って求めた。但し、CHF 相関式をバンドル平均流動条件を用いて評価する際には、ヒーターロッドに囲まれた中央サブチャンネルの質量速度については、全圧力損失一定、摩擦係数一定、密度一定の仮定のもとに、次式で定義される補正係数、 F_G 、をバンドル平均質量速度に乗じてもとめた。これは、Dalle Donne らの方法⁽⁸⁾と同一である。

$$F_G = G/G_{av} = \frac{(nA + n_w A_w + n_c A_c) D_h}{nA D_h + n_w A_w D_{hw} + n_c A_c D_{hc}} \quad (2)$$

ここで、

n = 中心サブチャンネルの数
 n_w = 側面サブチャンネルの数
 n_c = コーナーサブチャンネルの数
 A = 中心サブチャンネルの断面積
 A_w = 側面サブチャンネルの断面積
 A_c = コーナーサブチャンネルの断面積
 D_h = 中心サブチャンネルの水力学的等価直径
 D_{hw} = 側面サブチャンネルの水力学的等価直径
 D_{hc} = コーナーサブチャンネルの水力学的等価直径

ただし、本式には、グリッドスペーサの効果は含まれていない。各テスト部の F_p , F_h , F_G の値はTable 2.1に示してある。

2.2.2 実験条件

テスト部A, B, C, Dを用いた定常限界熱流束実験の実験パラメータを、それぞれTable 2.2 ~ 2.5に示す。

本装置の最大圧力は4.0 MPaであるため、加圧水型軽水炉の運転圧力16 MPaの1/4の圧力条件下で実験を実施せざるを得なかった。質量速度については、運転条件を十分包含している。テスト部出口平均クオリティに関しては、かなり小さな範囲までのデータが取れたが、負の出口クオリティ、即ちサブクール条件下での定常CHFデータは取得できなかった。これは、電源容量及びテスト部構造上の制約により、最大出力が制限されているためである。

2.2.3 実験結果

テスト部B, C, Dを用いて得られた定常CHF実験の全ケースについて、実験条件及び実験結果を付録Aに収録する。なお、テスト部Aのデータについては、既に報告してある⁽⁷⁾。定常CHF実験データ点数は、4種類のテスト部を合わせて計346点である。

本実験は軸方向一様発熱条件下で実施したため、DNBはテスト部出口近傍の熱電対で最初に検出された。水平方向のDNB発生位置は、7本ロッド（テスト部B, C）では、常に中心の高出力ロッドであった。一方水平方向の出力分布が一様である4本ロッドテスト部Dでは、最初のDNB発生は平均質量速度が900 kg/s.m²以下では、外側非加熱流路に面した熱電対で検出されたが、それ以上の質量速度では、中心サブチャンネルに面した位置で検出された。

2.3 流量低下非定常限界熱流束実験

2.3.1 実験方法

流量低下非定常CHF実験においては、系圧力、入口温度及びテスト部加熱電圧を一定に保持した状態で、インバータを介して循環ポンプ回転数を直線的に減少させ、DNBを発生させた。

ところで、本実験で使用したタービン流量計は、急速開閉弁を用いた流量変動試験の結果、時定数約1.6秒の一次遅れ特性を有することが分かった。流量変化を $f(t)$ とし、これに対応する時

定数Tの流量計による測定値を $g(t)$ とすると、一次遅れの関係は以下の式で表現される。

$$f(t) = T \frac{dg(t)}{dt} + g(t) \quad (3)$$

測定間隔を Δt とすると、時刻 t_i における流量 $f(t_i)$ は(3)式より、

$$f(t_i) = T(g(t_i) - g(t_{i-1})) / \Delta t + g(t_i) \quad (4)$$

で与えられる。流量低下実験の際には、流量計の応答の時間遅れを考慮して、(4)式により、入口流量の補正を行った。

DNB検出方法、CHF計算方法等は、2.2.1項で述べた定常実験の場合と同様である。

2.3.2 実験条件

流量低下CHF実験は、テスト部BとCを用いて実施した。各場合の実験条件の範囲を、それぞれTable 2.6 及び 2.7 に示す。

流量低下CHF実験は、原子炉冷却水循環ポンプの停止またはポンプ軸固着等の原因により、循環流量が急速に低下して、冷却能力が減少し、DNBに至る現象を対象としている。現行PWRの設置許可申請書によると、外電喪失による一次冷却材流量喪失事故時には、4秒間で流量は初期流量の75%まで低下し、一次冷却材ポンプ4台中1台のポンプ軸固着事故時には、1秒間で初期流量の77%まで低下している。従って、流量低下速度はこの範囲を包含するよう設定した。

実験はポンプ回転数を直線状に減少させる方法により行ったため、流量低下速度が大きい場合には、流量は初期にはゆっくりと減少し、その後急速に減少する特性を示した。なお、流量低下時間が18秒以上の実験は、準定常状態でのデータを取得するため実施した。また、テスト部Cの熱流束は高転換炉参照炉心⁽²²⁾での最大熱流束の1.13倍とし、初期質量流量は同炉の通常運転条件に合わせた。

2.3.3 実験結果

テスト部B、Cを用いた流量低下CHF実験の全ケースについて、初期条件、DNBに至る時間、DNB発生時の質量速度等のデータを、付録BのTable B-1及びB-2にそれぞれ収録する。

Table 2.1 Geometrical data and correction factors

Test section	Number of rods	Pitch (mm)	Heated length (mm)	Flow area (mm ²)	Equivalent diameter		Correction factor	
					D _{HE} (mm)	D _{HY} (mm)	D _{HC} (mm)	F _P
A	4	11.4	1.0	279	9.35	5.25	5.58	1.0
	7	11.4	1.0	453	8.67	5.66	5.58	0.980
B	7	10.7	0.5	314	6.01	4.03	3.79	1.28
	4	11.4	0.5	279	9.35	5.25	5.58	0.970
C	7	10.7	0.5	314	6.01	4.03	3.79	0.983
	4	11.4	0.5	279	9.35	5.25	5.58	1.18
D	4	11.4	0.5	279	9.35	5.25	5.58	0.887
	7	10.7	0.5	314	6.01	4.03	3.79	0.956

(note)

D_{HE} : Heated equivalent diameter for whole bundle.D_{HY} : Hydraulic equivalent diameter for whole bundle.D_{HC} : Hydraulic equivalent diameter for central subchannel surrounded by heater rods.F_P : Power ratio (hot rod/bundle average).F_h : Power ratio (effective heated power/total electrical power).F_G : Mass velocity correction factor for central subchannel defined by eq. (2)

Table 2.2 Range of parameters for steady-state CHF experiments
 - Test section A (4-rods, L = 1.0 m, P/D = 1.2) -

Nominal pressure (MPa)	1.0	2.0	3.9
Pressure (MPa)	1.05 ~ 1.27	2.03 ~ 2.09	3.88 ~ 3.95
Inlet temperature (K)	352 ~ 441	421 ~ 465	402 ~ 508
Inlet subcooling (10^6 J/kg)	0.081 ~ 0.464	0.108 ~ 0.304	0.076 ~ 0.547
Mass velocity (kg/s.m^2)	599 ~ 2530	609 ~ 2590	559 ~ 4170
Velocity (m/s)	0.65 ~ 2.78	0.68 ~ 2.94	0.64 ~ 5.03
Bundle-averaged exit quality	0.10 ~ 0.29	0.13 ~ 0.41	0.09 ~ 0.35
CHF (10^6 W/m^2)	0.95 ~ 2.76	1.37 ~ 2.68	1.03 ~ 2.84
Number of data points	26	28	73

Table 2.3 Range of parameters for steady-state CHF experiments
 - Test section B (7-rods, L = 1.0 m, P/D = 1.2) -

Nominal pressure (MPa)	1.0	3.9
Pressure (MPa)	1.08	3.54 ~ 3.93
Inlet temperature (K)	401 ~ 410	395 ~ 501
Inlet subcooling (10^6 J/kg)	0.210 ~ 0.253	0.102 ~ 0.563
Inlet mass velocity (kg/s.m ²)	696 ~ 2160	630 ~ 2670
Bundle-averaged exit quality	0.043 ~ 0.141	0.021 ~ 0.188
CHF (10^6 W/m ²)	0.949 ~ 2.21	0.875 ~ 2.30
Number of data points	19	77

Table 2.4 Range of parameters for steady-state CHF experiments
 - Test section C (7-rods, L = 0.5 m, P/D = 1.126) -

Nominal pressure (MPa)	1.0	3.9
Pressure (MPa)	1.08	3.93
Inlet temperature (K)	400 ~ 435	417 ~ 512
Inlet subcooling (10^6 J/kg)	0.098 ~ 0.248	0.053 ~ 0.477
Inlet mass velocity (kg/s.m ²)	654 ~ 2570	462 ~ 3090
Bundle-averaged exit quality	0.091 ~ 0.203	0.082 ~ 0.260
CHF (10^6 W/m ²)	1.20 ~ 2.90	0.742 ~ 2.88
Number of data points	22	62

Table 2.5 Range of parameters for steady-state CHF experiments
 - Test section D (4-rods, L = 0.5 m, P/D = 1.2) -

Nominal pressure (MPa)	3.9
Pressure (MPa)	3.67 ~ 3.93
Inlet temperature (K)	456 ~ 503
Inlet subcooling (10^6 J/kg)	0.0905 ~ 0.308
Inlet mass velocity (kg/s.m ²)	722 ~ 4270
Bundle-averaged exit quality	0.023 ~ 0.211
CHF (10^6 W/m ²)	1.83 ~ 4.75
Number of data points	39

Table 2.6 Range of parameters for flow reduction CHF experiments
 - Test section B (7-rods, L = 1.0 m, P/D = 1.2) -

Pressure (MPa)	1.08	3.93
CHF (10^6W/m^2)	1.54	1.48, 1.82
Inlet temperature (K)	406 ~ 411	442 ~ 504
Initial inlet mass velocity (kg/s.m^2)	3006 ~ 3350	2820 ~ 3030
Initial bundle-averaged exit quality	-0.02	-0.08 ~ 0.06
Time to DNB (s)	0.55 ~ 0.85	0.5 ~ 18.4
Number of data points	2	40

Table 2.7 Range of parameters for flow reduction CHF experiments
 - Test section C (7-rods, L = 0.5 m, P/D = 1.126) -

Pressure (MPa)	3.86 ~ 3.93
CHF (10^6W/m^2)	1.37, 1.57
Inlet temperature (K)	470, 500
Initial inlet mass velocity (kg/s.m^2)	1420 ~ 3350
Initial bundle-averaged exit quality	-0.061~ 0.023
Time to DNB (S)	0.6 ~ 25.4
Number of data points	24

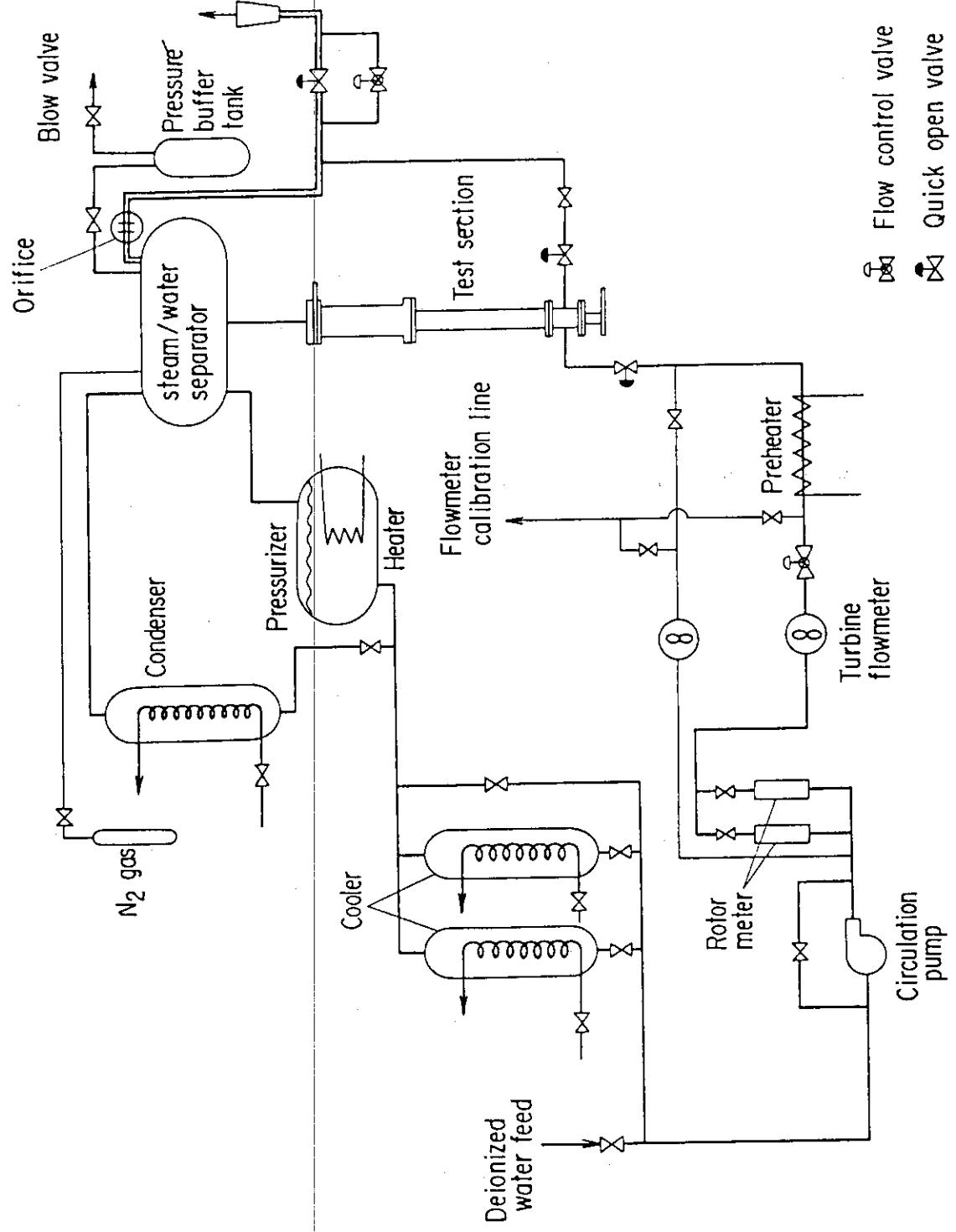


Fig. 2.1 CHF test facility

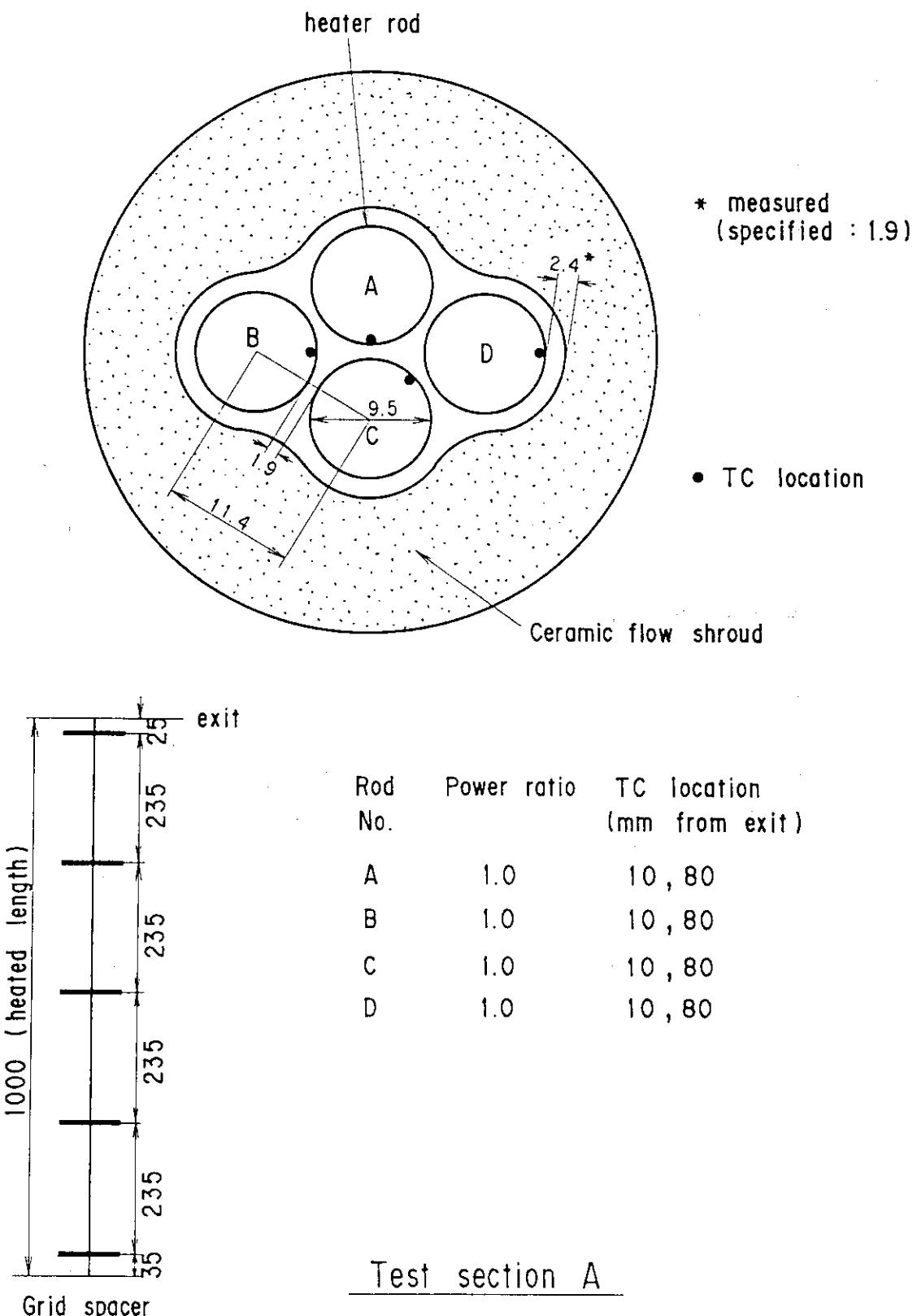


Fig. 2.2(a) Cross section, thermocouple location, and grid spacer location of Test section A (4-rods, L=1.0 m, P/D=1.2)

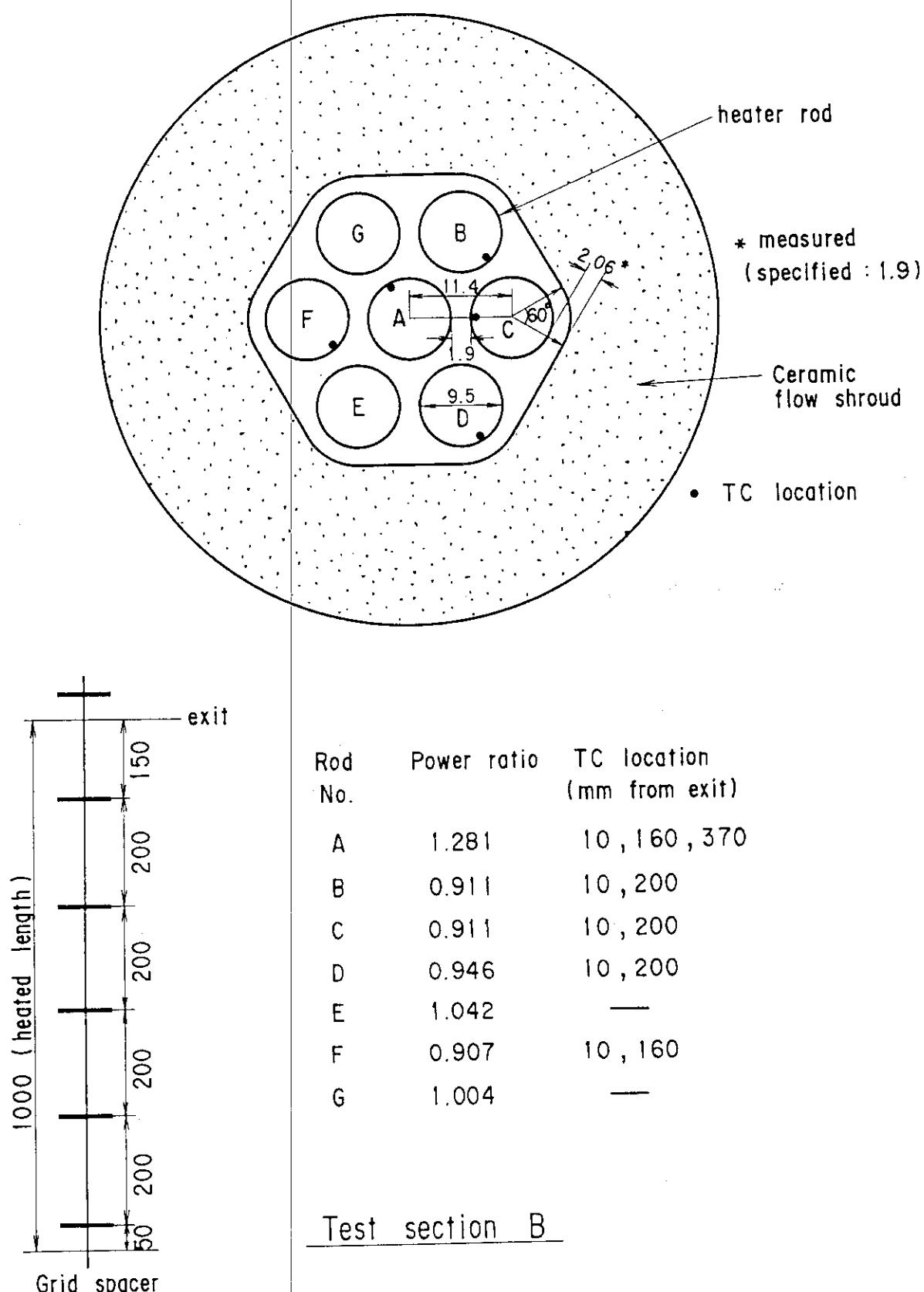


Fig. 2.2(b) Cross section, thermocouple location, and grid spacer location of Test section B (7-rods, L=1.0 m, P/D=1.2)

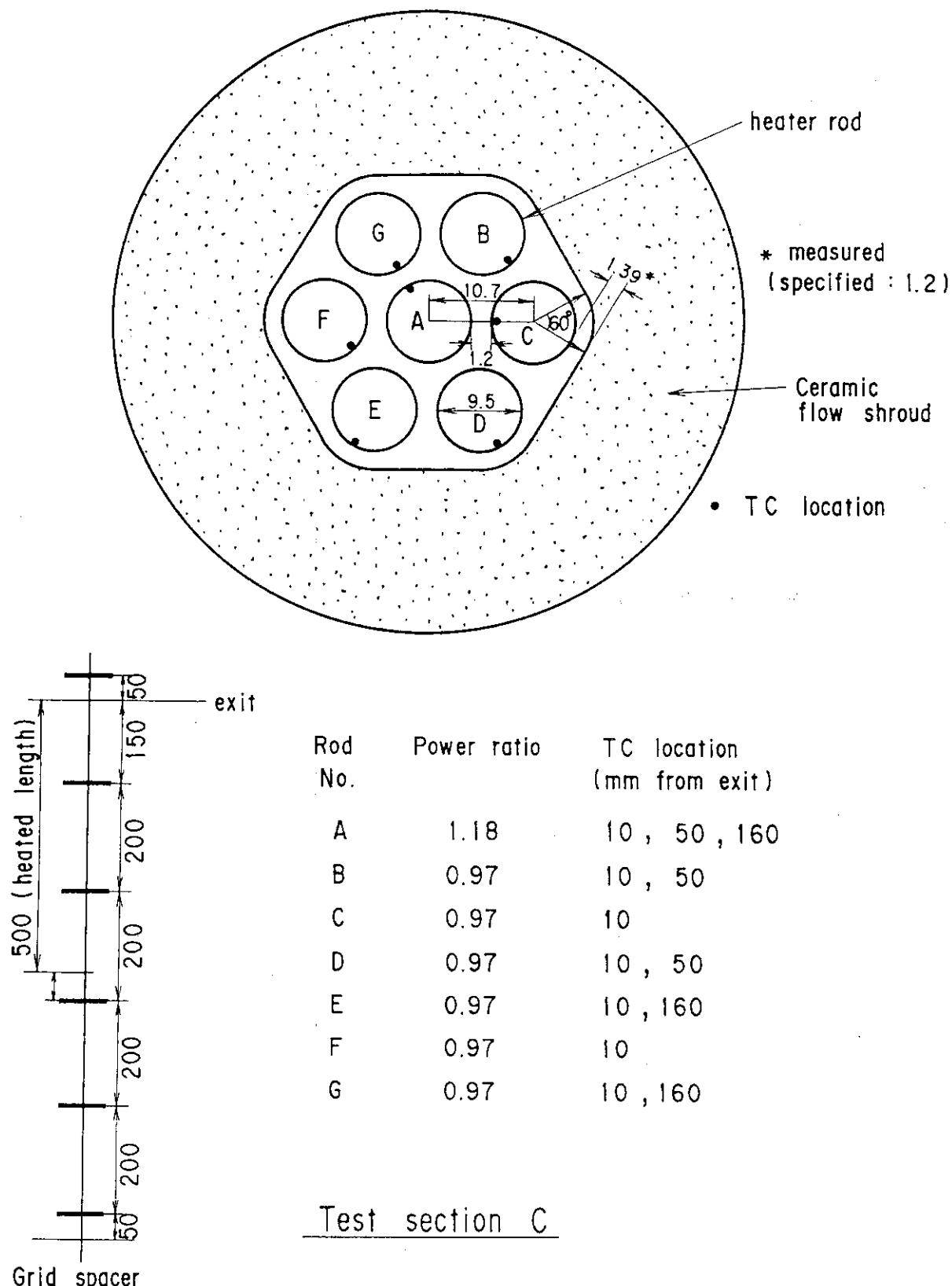
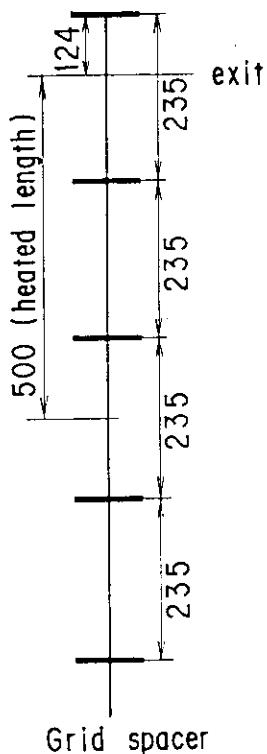
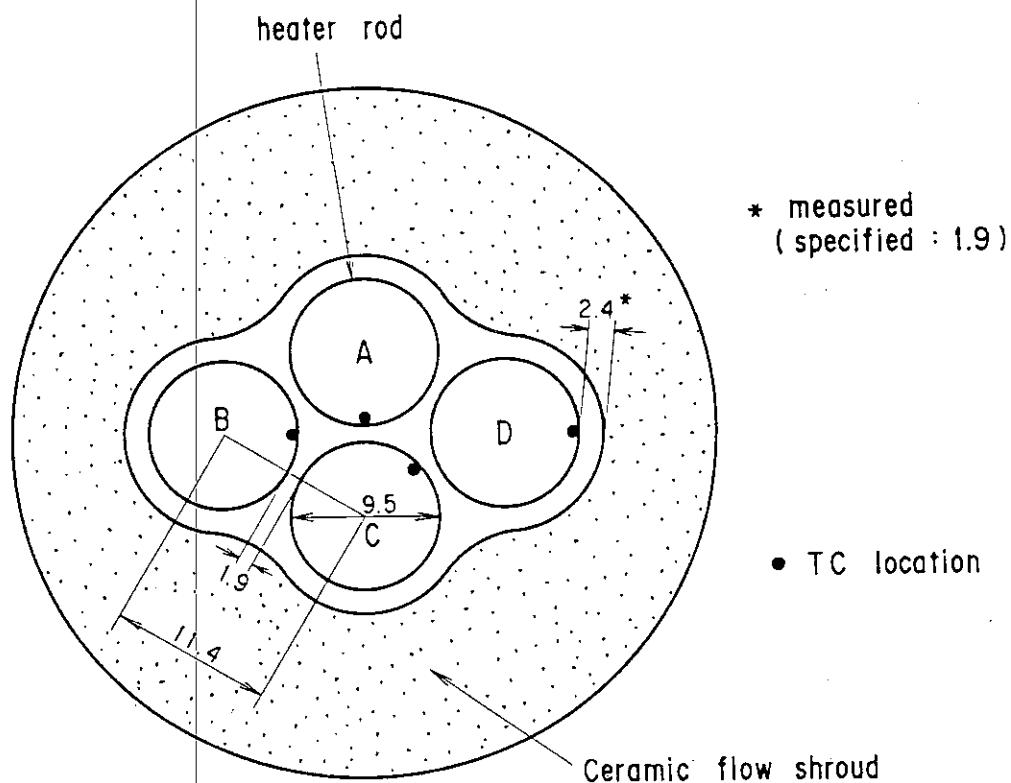


Fig. 2.2(c) Cross section, thermocouple location, and grid spacer location of Test section C (7-rods, L=0.5 m, P/D=1.126)



Rod No.	Power ratio	TC location (mm from exit)
A	1.0	10, 50, 146
B	1.0	10, 50, 381
C	1.0	10, 50, 490
D	1.0	10, 50, 250

Test section D

Fig. 2.2(d) Cross section, thermocouple location, and grid spacer location of Test section D (4-rods, L=0.5 m, P/D=1.2)

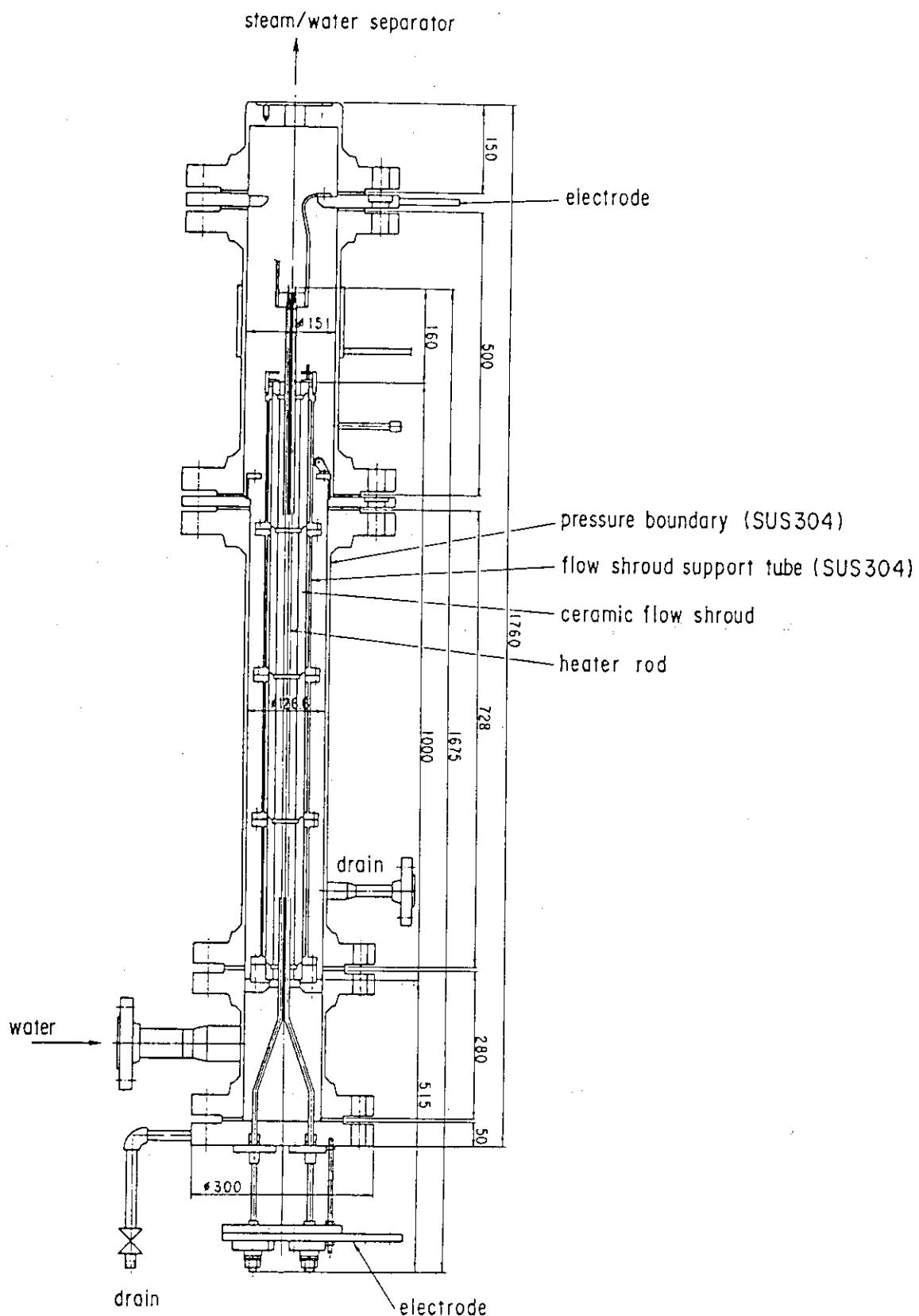


Fig. 2.3(a) Pressure vessel for Test section A

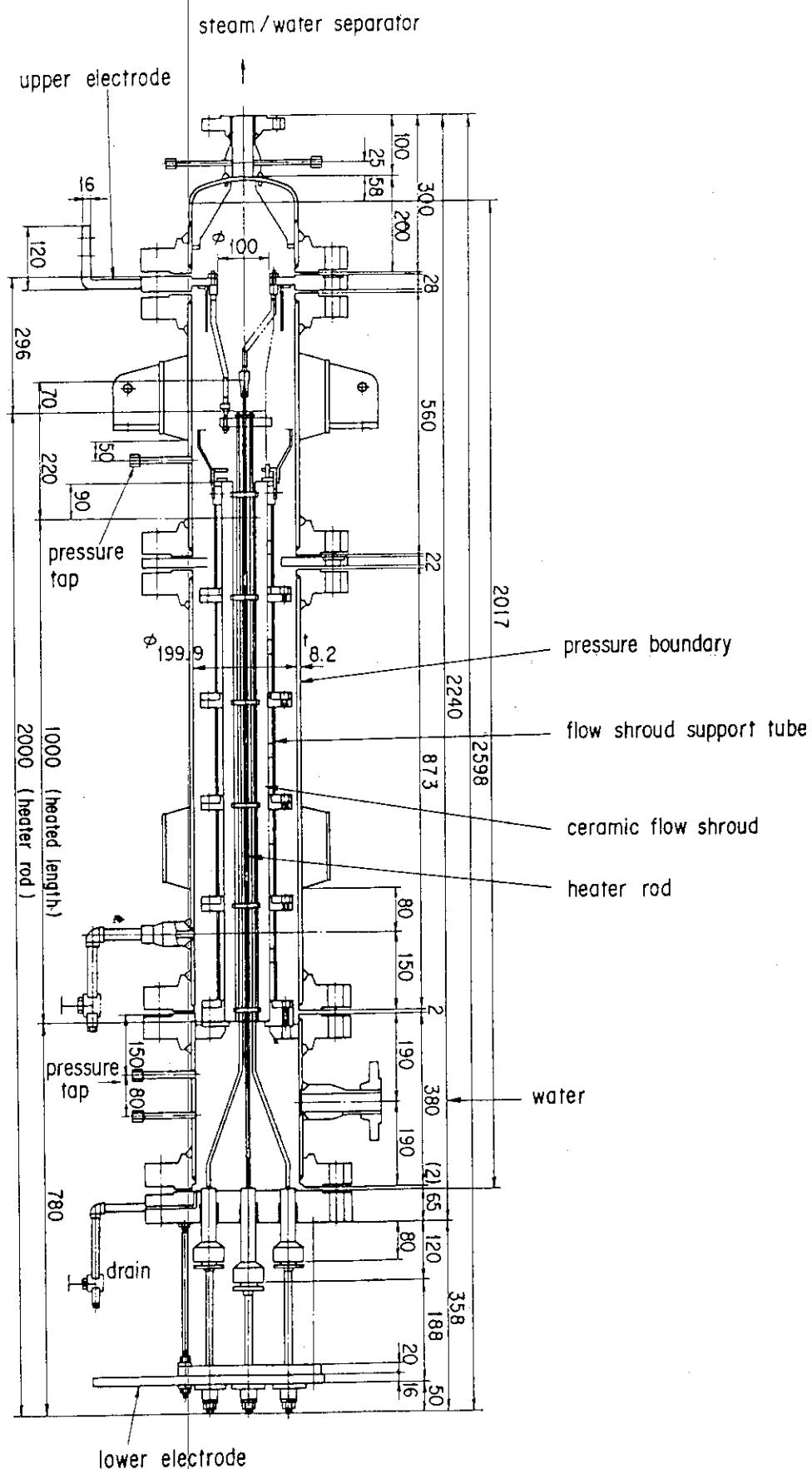


Fig. 2.3(b) Pressure vessel for Test sections B and C

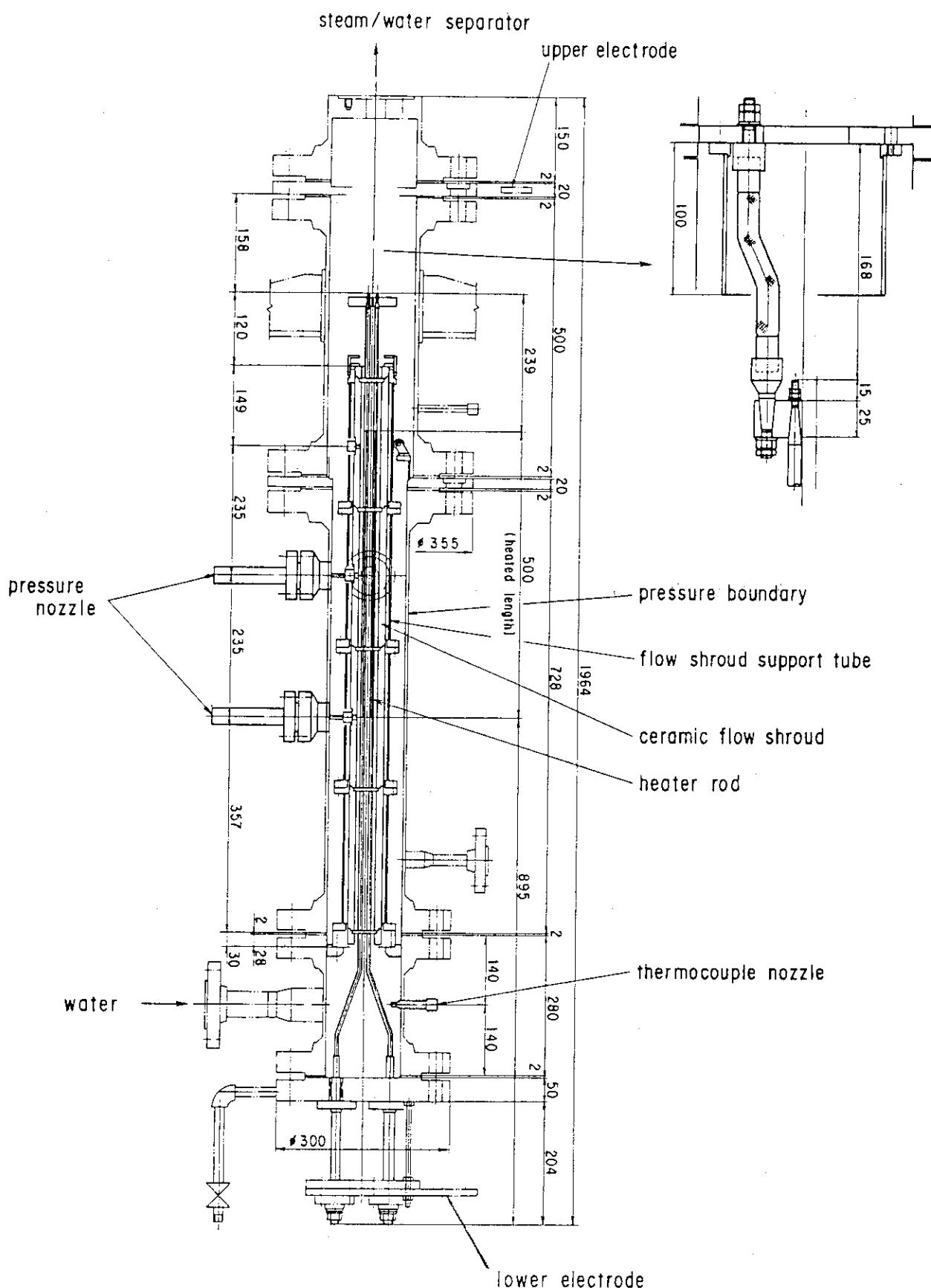


Fig. 2.3(c) Pressure vessel for Test section D

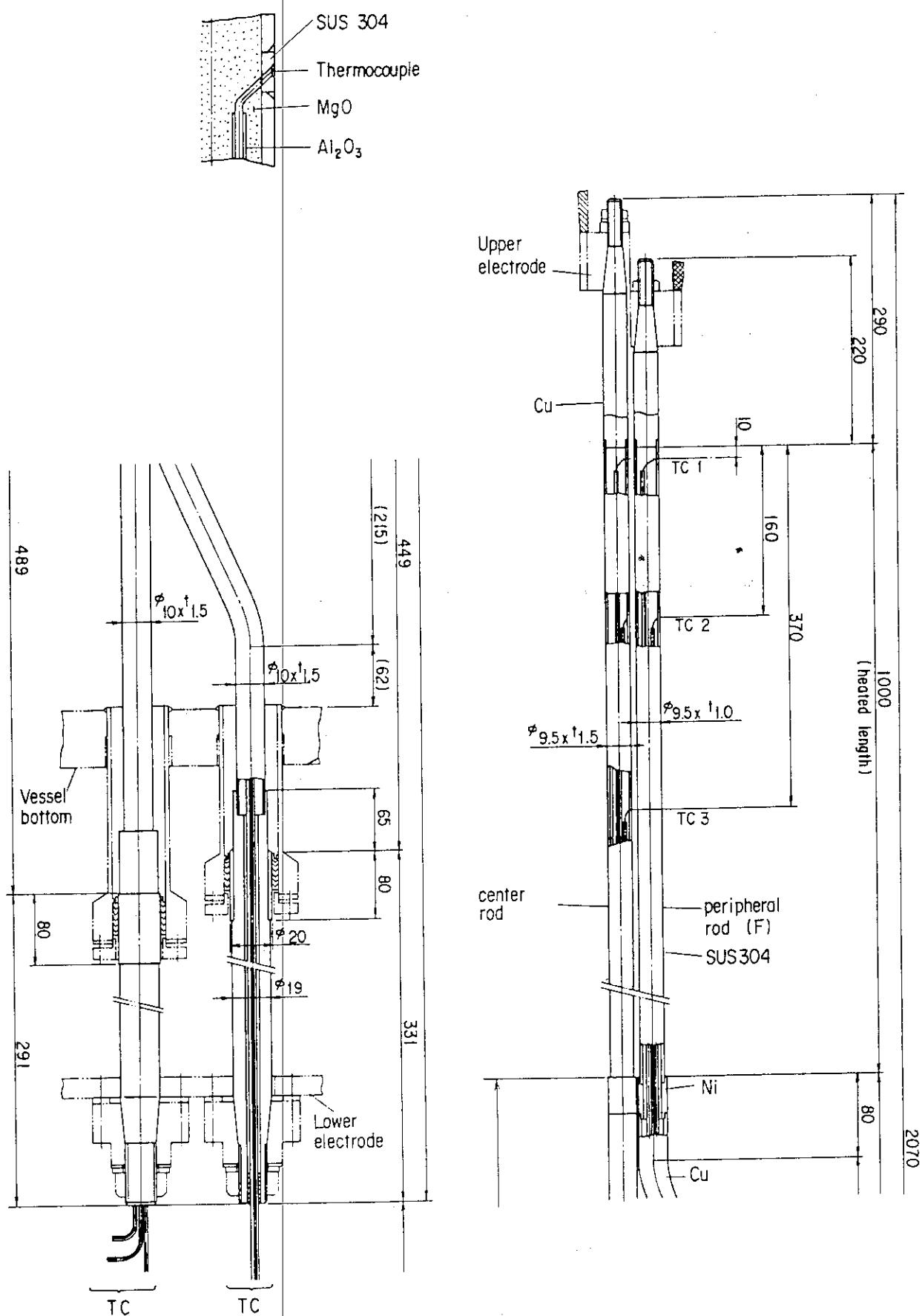


Fig. 2.4 Heater rod

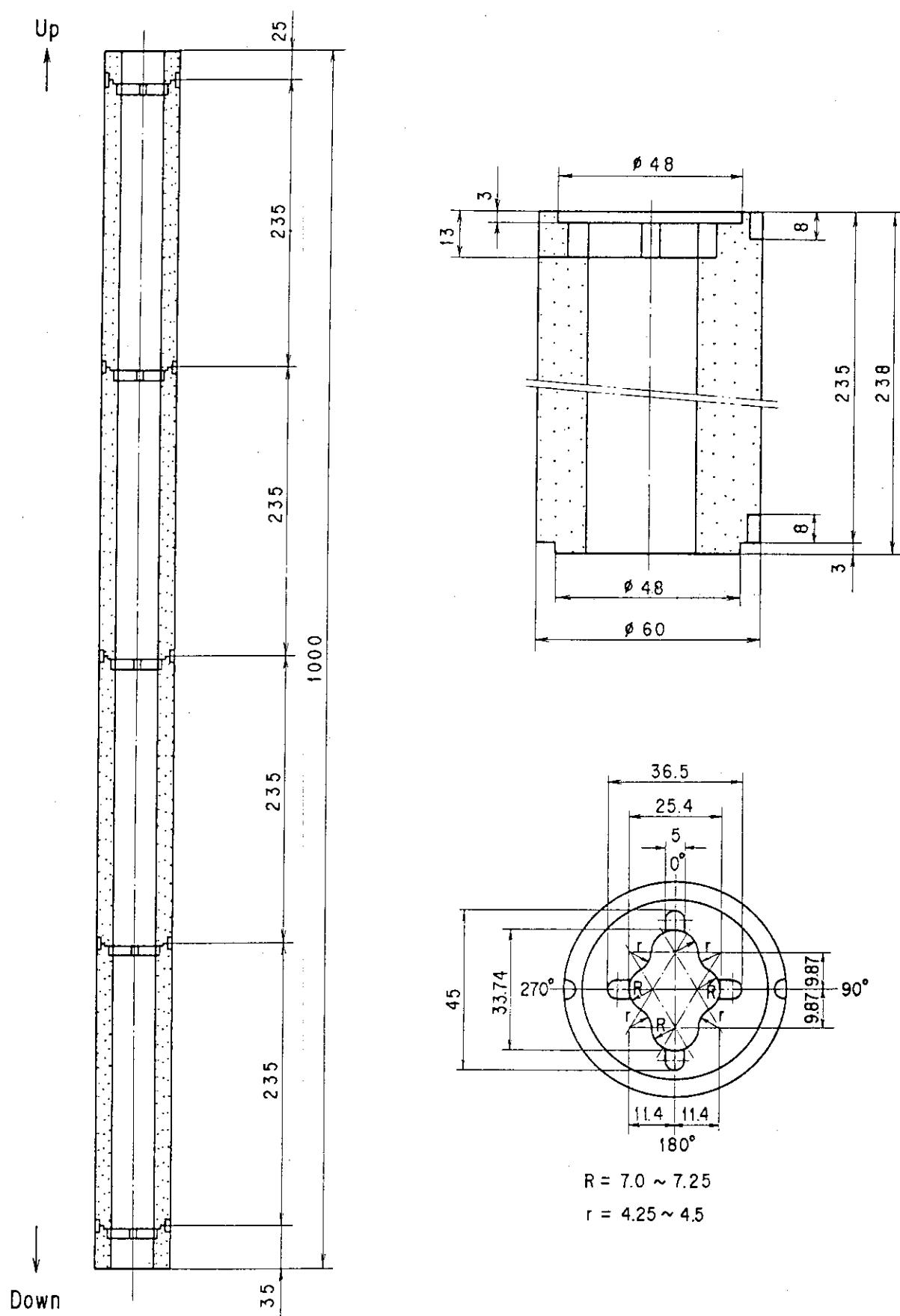


Fig. 2.5(a) Ceramic flow shroud for Test section A

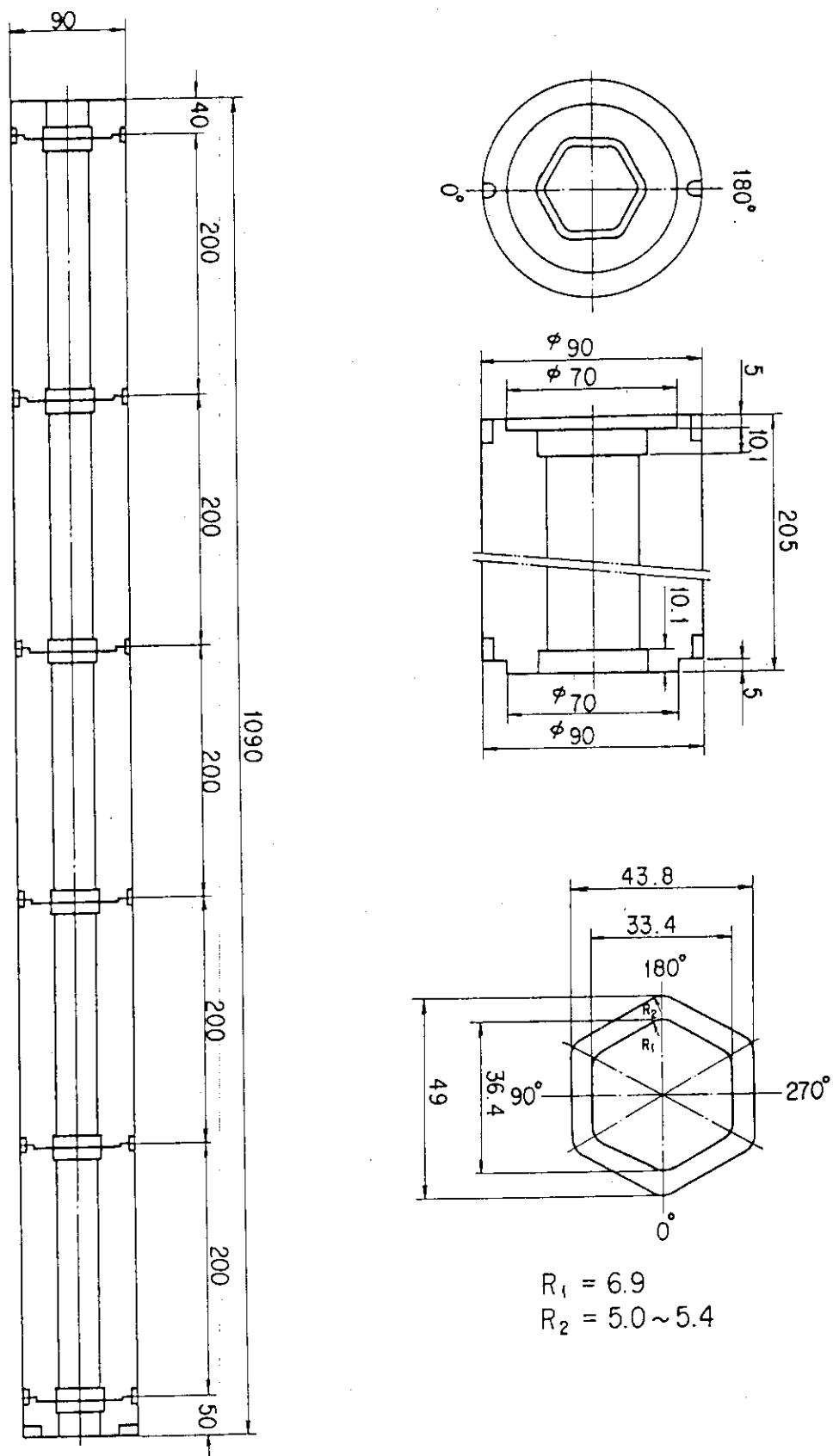
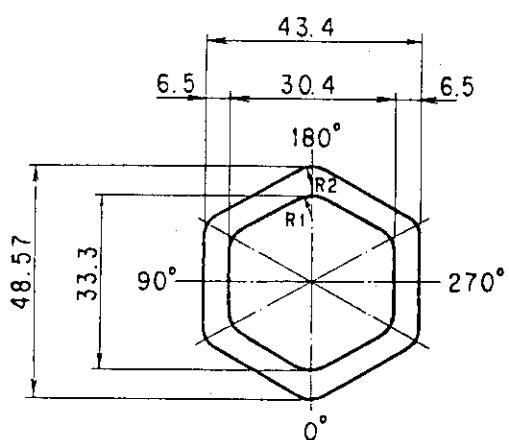
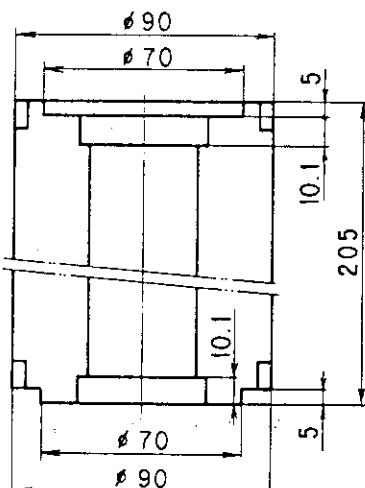
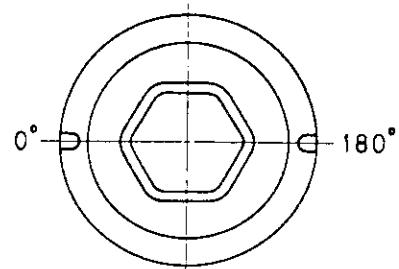
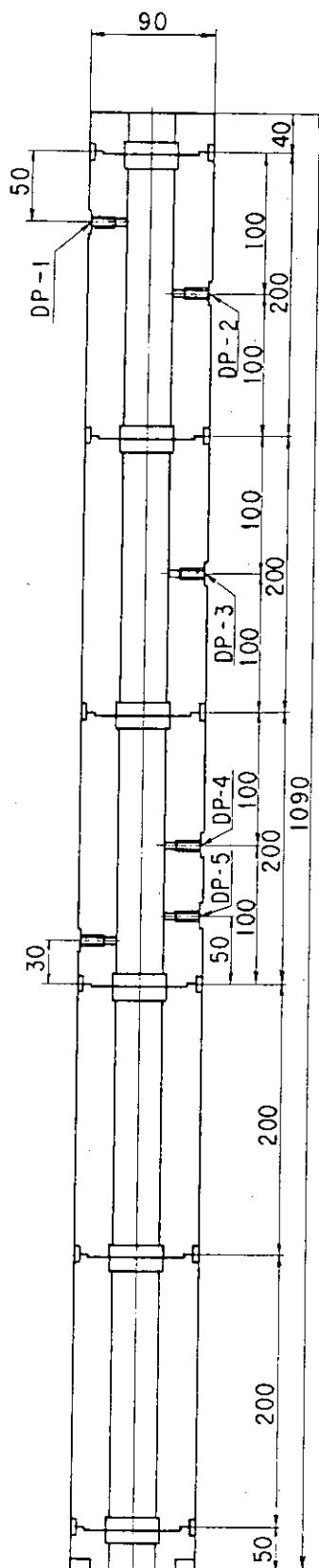


Fig. 2.5(b) Ceramic flow shroud for Test section B



$$R1 = 5.95 \sim 6.25$$

$$R2 = 5.0 \sim 5.4$$

Fig. 2.5(c) Ceramic flow shroud for Test section C

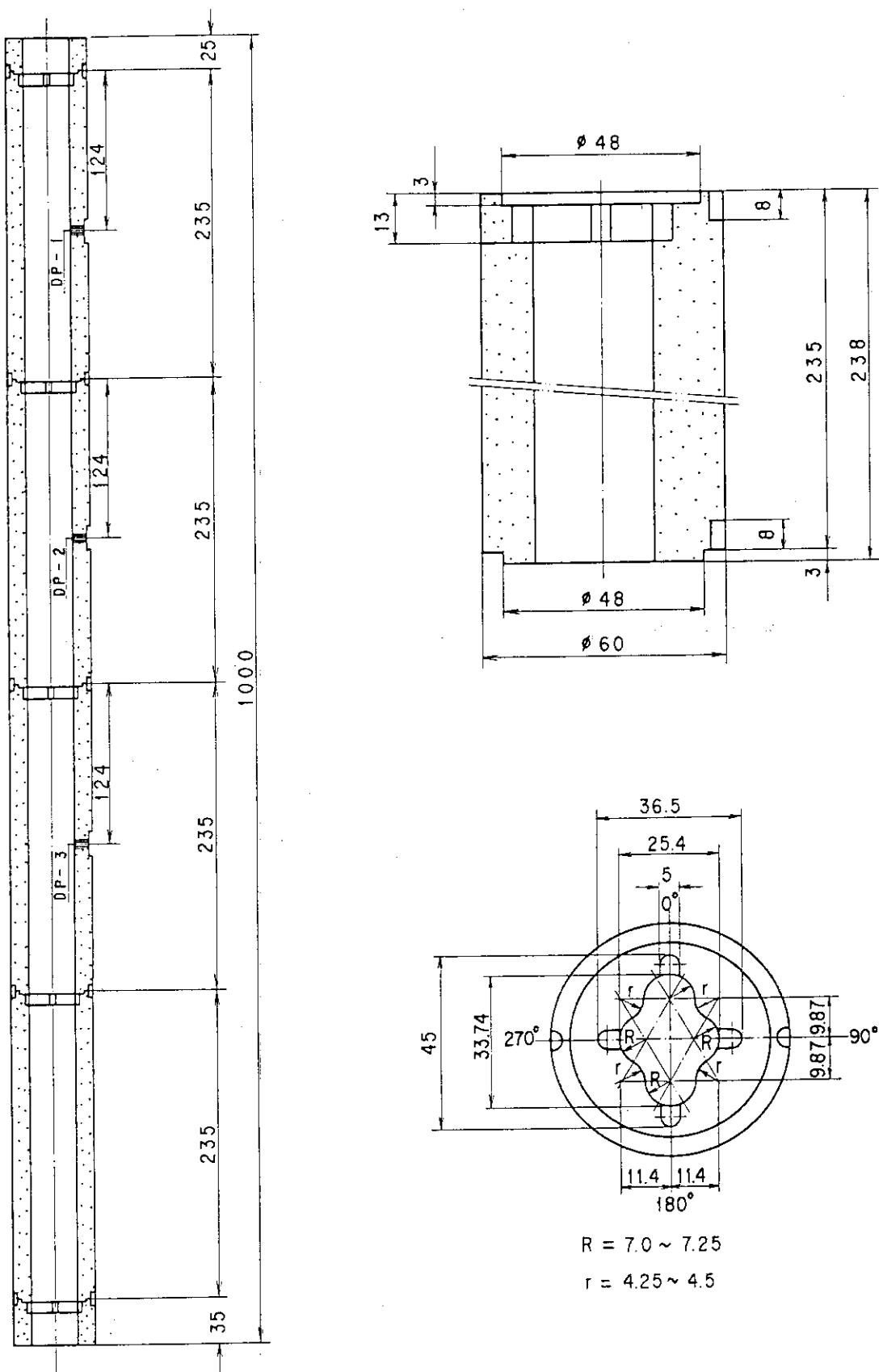


Fig. 2.5(d) Ceramic flow shroud for Test section D

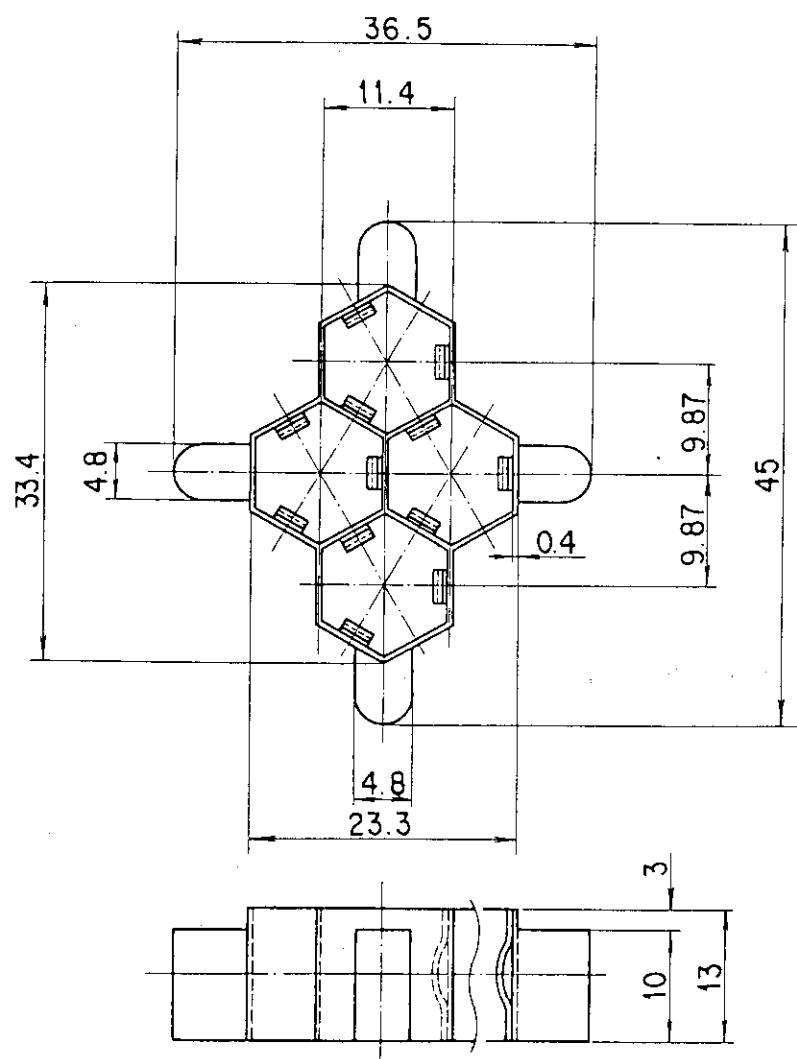
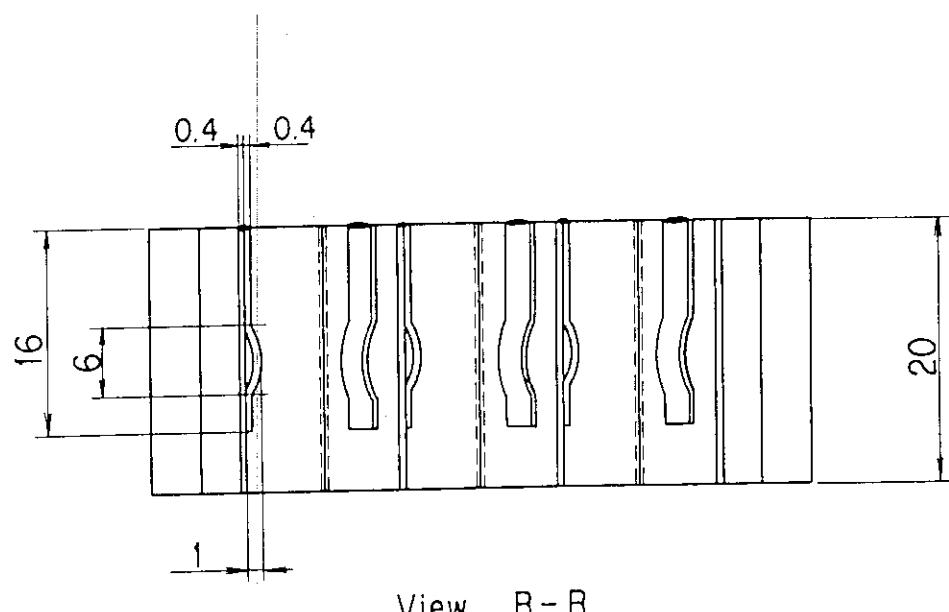
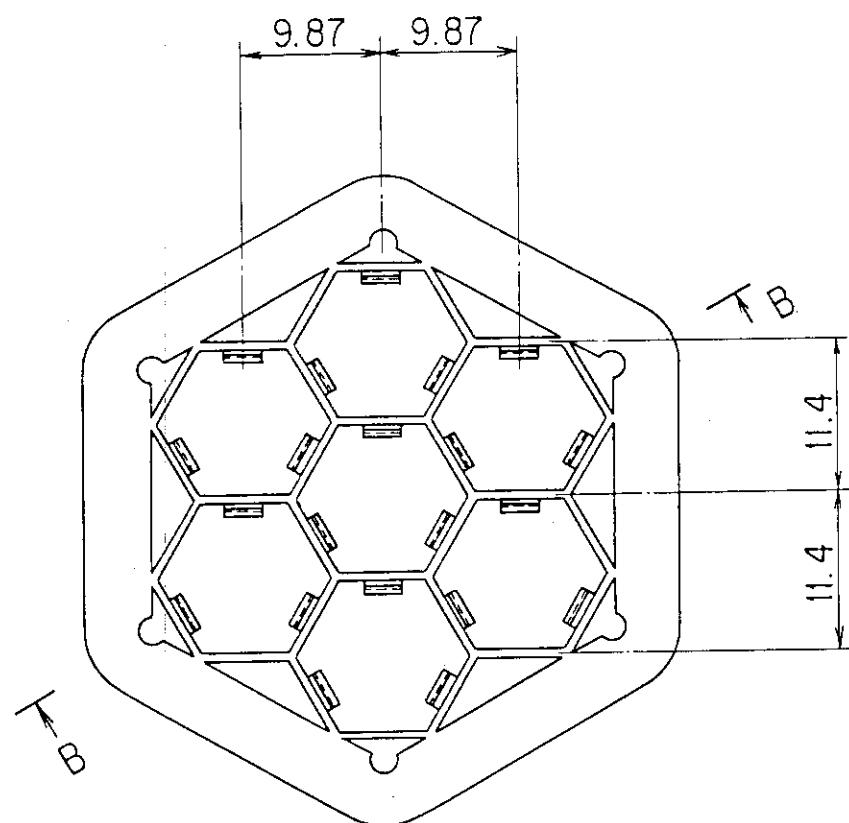
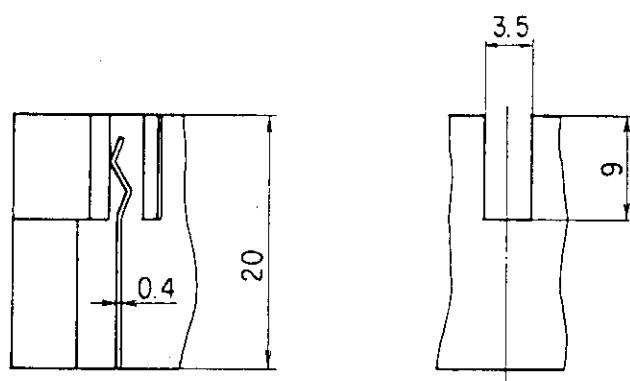
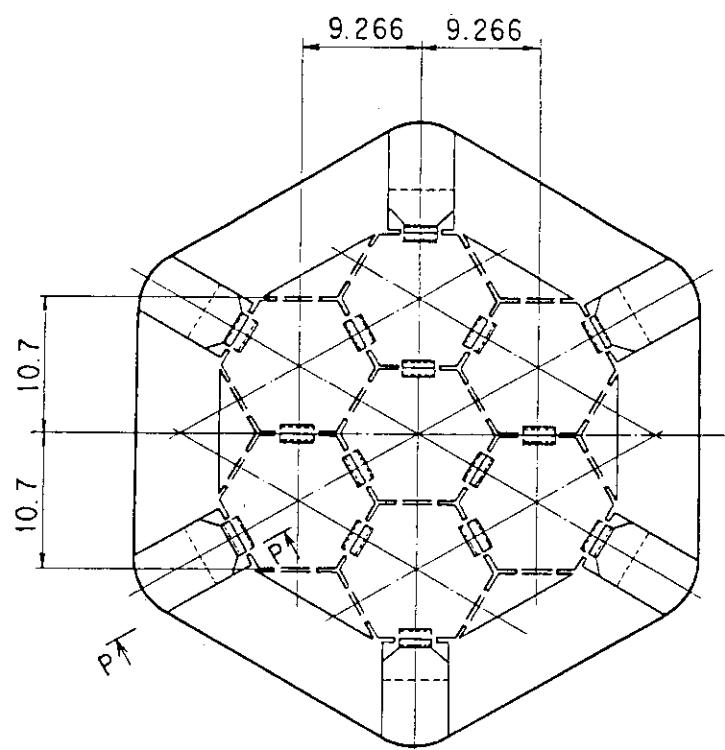


Fig. 2.6(a) Configuration of grid spacer for Test sections A and D



View B - B

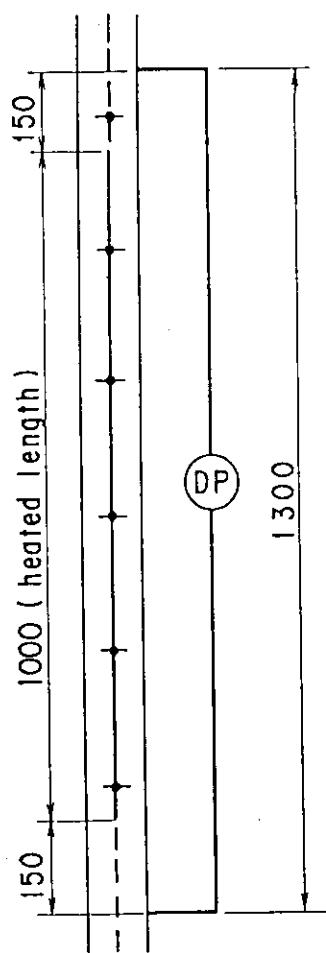
Fig. 2.6(b) Configuration of grid spacer for Test section B



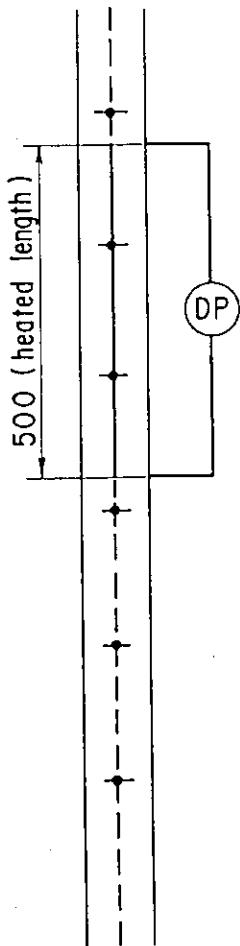
View P-P

Fig. 2.6(c) Configuration of grid spacer for Test section C

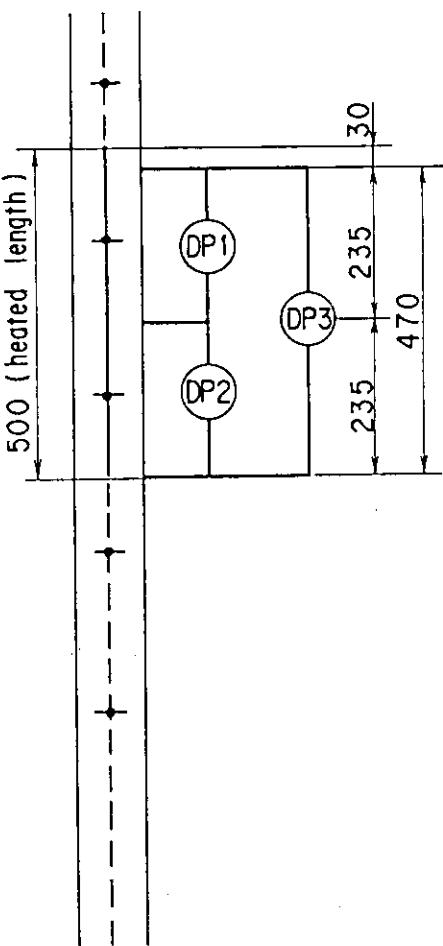
Test section B



Test section C



Test section D



—●—
Grid spacer

Fig. 2.7 DP measurement locations

3. 実験結果の検討

バンドル形状の場合には、サブチャンネル間の流体混合により、各サブチャンネルにおける質量速度やクオリティなどの流動条件は均一ではない。CHFは局所的な現象なので、CHFの評価の際には、バンドル内の流動の不均一性を考慮する必要がある。特に、本実験のように、4～7本バンドルと本数が少なく、ロッド間に発熱分布がある場合（7本ロッドバンドル）などには、流動条件の不均一性は大きくなると考えられる。このため、流体混合効果を考慮したサブチャンネル解析コードを用いて、サブチャンネルごとの流動条件を計算し、この値をCHF相関式の評価に用いる方法が一般的である。

以下では、3.1節でバンドル平均値を用いて各種パラメータの効果及びCHF相関式の予測精度を調べ、次に3.2節でサブチャンネル解析結果を適用した場合のCHF相関式の予測精度の向上について考察する。3.3節では流量低下時のCHF特性について述べる。

3.1 バンドル平均値に基づくCHF相関式の評価

3.1.1 発熱長さ、P/D、ロッド本数がCHFに及ぼす効果

以下では、系圧力が3.9 MPaで入口温度が230及び200°Cの限界熱流束(CHF)データを用いて、テスト部相互の比較を行う。これは、この範囲のCHFデータを最も多く取得したので、統計的誤差を考慮した場合、相互比較に有効なためである。

(1) ロッド本数の効果

テスト部A、BはP/D及び発熱長さが同一で、ロッド本数のみが異なるため、両データを比較することにより、ロッド本数の効果が調べられる。

Fig. 3.1 及び 3.2 にテスト部A及びBについてCHFの測定値とバンドル平均質量速度及びバンドル平均出口クオリティとの関係をそれぞれ示す。Fig. 3.1より、同一質量速度に対しては、4本ロッド（テスト部A）のCHFの方が大きくなる傾向が認められ、特に入口温度が低い場合に、その差が顕著となっている。一方、クオリティに関するプロット(Fig. 3.2)では、明らかに4本ロッドの方がCHFの値が高くなっている。

このような特性は以下の理由によると考えられる。7本ロッドのテスト部Bでは中心ロッドの発熱量が周辺ロッドよりも約20%程度高いため、バンドル内での流動条件の不均一性が大きくなる。Table 3.5に示したサブチャンネル解析結果より、テスト部A、Bについて、DNB発生時の中心ロッドを含むサブチャンネル（ホットサブチャンネル）出口の質量速度計算値と平均質量速度との比の平均値を求めるとき、それぞれ、0.801及び0.746となり、同様に局所クオリティと平均クオリティとの比を求めるとき、それぞれ1.75及び2.09となった。即ち、7本ロッドテスト部Bにおいては、バンドル平均値に比べて、ホットサブチャンネルでの質量速度の低下量及びクオリティの増加量は、4本ロッドテスト部Aの場合よりも大きくなっていると推察される。従って、平均質量速度や平均クオリティが同一でも、7本ロッド

ドよりもCHFが小さくなる。Fig. 3.3には、DNB発生時のホットサブチャンネル出口の質量速度計算値と平均質量速度の比と入口水温の関係を示す。本図より、入口温度が低いほど、この比は小さくなり、不均一性が大きくなることが分かる。従って、入口水温が低いほどロッド本数の効果が顕著になると考えられる。

(2) 発熱長さの効果

テスト部A, DはP/D及びロッド本数が同一で、発熱長さのみが異なるため、両データを比較することにより、発熱長さの効果が調べられる。

Fig. 3.4 及び 3.5 にテスト部 A 及び D について CHF の測定値とバンドル平均質量速度及びバンドル平均出口クオリティとの関係をそれぞれ示す。Fig. 3.4 に見られるように、同一質量速度に対しては、発熱長さが 0.5 m のテスト部 D の方が発熱長さが 1.0 m のテスト部 A よりも CHF が大きくなっている。これは、同一質量速度で出口エンタルピーも同一とするためには、発熱長さの短いテスト部のほうがエンタルピー上昇に要する長さが短いので、DNB に至るには、発熱長さの長いテスト部よりも大きな熱流束が必要となるためである。

一方、Fig. 3.5 に見られるように、クオリティが 0.18 より小さい領域では、同一クオリティに対して、テスト部 D の方が CHF が大きくなり、クオリティが 0.18 以上の領域では、両テスト部間の差はほとんど認められない。これは、クオリティが同一でも質量速度が異なっているので、出口流動条件の差が存在するためである。

(3) P/D, 発熱長さ, ロッド本数の複合効果

P/D が小さくなると、等価直径も小さくなるため、CHF は低下すると考えられる。本実験では、ロッド本数及び発熱長さが同一で、P/D のみが異なるテスト部のデータは取得できなかったため、P/D の効果のみを抽出して調べることはできなかった。しかしながら、テスト部 C は配列ピッチが 10.7 mm ($P/D = 1.126$) で、他のテスト部の 11.4 mm ($P/D = 1.2$) に比べて小さいため、テスト部 C のデータを他のテスト部のデータと比較することにより、P/D, 発熱長さ, ロッド本数の複合効果を調べることはできる。

Fig. 3.6 及び 3.7 に、テスト部 A, B, C 及び D について CHF の測定値とバンドル平均質量速度及びバンドル平均出口クオリティとの関係をそれぞれ示す。この比較より、テスト部 C (発熱長さ 0.5 m) の CHF はテスト部 B (1.0 m) の CHF より大きくなっているが、その差はテスト部 A と D の差に比べると小さい。これは、発熱長さ減少による CHF 増加効果が、P/D 減少による CHF の低下効果と相殺したためと考えられる。

3.1.2 CHF 相関式の予測精度

Fig. 3.8 ~ 3.12 に、WSC-2 (Triangular)⁽¹⁵⁾, KfK⁽⁸⁾, EPRI-B&W⁽⁹⁾, EPRI-Columbia⁽¹⁰⁾ 及び Katto (Annuli)⁽¹⁶⁾ の各 CHF 相関式による予測値と実験値との比 (CHFR) とバンドル平均質量速度との関係を示す。これらの相関式のうち、WSC-2, KfK, EPRI-B&W の 3 式は本実験と同様の三角配列バンドルを対象としている。一方、EPRI-Columbia 相関式は従来型軽水炉を、Katto 相関式は環状流路をそれぞれ対象としており、本実験の形状とは一致していない。各相関式の内容と使用したデータベース (適用範囲) については、付録 C に述べる。

Fig. 3.8 ~ 3.12 の比較結果より、以下の点が明らかとなった。

- (1) 質量速度が小さい領域では一般にCHFRは大きく、質量速度が大きくなるとCHFRの質量速度依存性は小さくなる。
- (2) 1500 kg/s.m²以上の質量速度で比較すると、WSC-2, EPRI-Columbia及びKattoの相関式によるCHFRは1より大きくなり、実験値を過大評価している。一方、KfK及びEPRI-B&W相関式による予測値は実験値よりも小さくなっている。このうち、EPRI-B&W相関式によるCHFRは質量速度が増大すると共に大きくなる傾向にあるが、その他の相関式によるCHFRは、質量速度が大きくなるとほぼ一定値となっている。
- (3) CHFRのテスト部形状依存性は、KfK及びEPRI-B&W相関式では比較的小さいが、その他の相関式では大きくなっている。

以上の相関式の一般性を調べるために、他の研究機関のCHFデータとの比較も行った。即ち、米国のBettis原子力研究所で実施された三角配列 密格子体系でのCHF実験データ⁽¹¹⁾を用いてCHF相関式の評価を行った結果、本体系でのCHF予測にはKfK相関式が最も適しており、その予測精度は、実験値と計算値の比の平均値が0.991で標準偏差が0.110と評価された⁽²³⁾。なお、KfK相関式は形状ファクター及びスペーサーファクターを求める際に、上記のデータベースを用いている。以上の平均流動条件に基づく検討結果によると、三角配列バンドルのCHFを求める際には、KfK相関式をベースにするのが適当と思われる。

3.2 サブチャンネル解析結果に基づくCHF相関式の評価

3.2.1 COBRA-IV-Iコードによるサブチャンネル解析

サブチャンネル間の流れの不均一性を考慮し、局所流動条件を用いてCHF相関式の評価を行うため、COBRA-IV-Iコード⁽¹⁴⁾を用いてサブチャンネル解析を実施した。

Fig. 3.13に4本及び7本ロッドバンドルのサブチャンネル解析ノーディングモデルを示す。

Table 3.1に、解析に使用したCOBRA-IV-Iコードの入力パラメータを示す。このうち主要な入力パラメータについて以下に述べる。

(1) 乱流混合係数

COBRA-IV-Iコードを用いた感度解析の結果^{(5),(7)}、本コードでサブチャンネル間の流体混合量を求めるのに使用する乱流混合係数の値が解析結果に顕著な影響を及ぼすことが明らかとなった。

ここで、COBRA-IV-Iで用いられている混合係数は次式で定義される。

$$W_{ij} = \beta SG_{av} \quad (5)$$

ここで、 W_{ij} = サブチャンネル間の乱流混合による単位長さ当たりの

質量移動量 (kg/s.m)

β = 混合係数 (無次元)

S = ロッドギャップ間隔 (m)

G_{av} = 隣接サブチャンネルの軸方向質量速度平均値 (kg/s.m²)

乱流混合係数は解析対象とするバンドル形状に依存すると考えられるので、本報では以下

のようにして乱流混合係数の入力値を決定した。まず、各CHFテスト部と同一形状のテスト部を流動試験装置に取り付けて、単相流条件下での流体混合実験を実施し、各テスト部ごとの単相流混合係数を求めた⁽¹²⁾。本実験結果より、サブチャンネル解析に用いる単相流混合係数 β_0 として、以下の値を得た。

$$\text{テスト部 A, D} \quad \beta_0 = 0.004$$

$$\text{テスト部 B, C} \quad \beta_0 = 0.003$$

次に、二相流条件下の混合係数については、二相流サブチャンネル混合実験の文献調査の結果、佐田富の大気圧下での空気-水二相流実験データ⁽¹⁷⁾に基づき、COBRA-IV-Iコードで使用する混合係数とボイド率との関係を求めた⁽¹³⁾。この関係式は二相流の混合係数 β と単相流の混合係数 β_0 の比 (β/β_0) をボイド率 α の関数として表示したもので、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \beta/\beta_0 &= 1.0 \quad (0.0 < \alpha < 0.15) \\ &= 4.0 \quad (0.3 < \alpha < 0.8) \\ &= 1.0 \quad (\alpha = 1.0) \\ &= \text{内挿} \quad (0.15 < \alpha < 0.3 \text{ 及び } 0.8 < \alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

この関係式を用いると、Rowe and Angleの高圧下 (6.21 MPa) での沸騰二相流サブチャンネル混合実験⁽¹⁸⁾のエンタルピー分布をよく予測した⁽¹³⁾。

Table 3.2 に、混合係数を一定 (0.001, 0.003, 0.012) とした場合と、上記のようにボイド率の関数として混合係数を与えた場合について、COBRA-IV-I コードによるホットチャンネル出口の質量速度及びエンタルピー計算値と、KfK 相関式を用いて求めた CHFR の値を示す。なお、 $\beta = 0.001$ はピッチ 11.4 mm の 36 本バンドルを用いて求めた混合係数の値⁽¹²⁾であり、 $\beta = 0.003$ はテスト部 B の単相流混合係数の実験値、 $\beta = 0.012$ はボイド率が 0.3 から 0.8 の範囲内の二相流混合係数の推定値に対応している。この結果より、混合係数が小さい程、サブチャンネル間の流動の不均一性が大きくなっている、ホットチャンネルでの質量速度は小さく、エンタルピーは大きくなるため、CHFR の値は小さくなることがわかる。混合係数をボイド率の関数として与えた場合に比較して、 β を 0.001 ~ 0.012 の範囲内で一定とすると、CHFR は 75 % ~ 104 % の範囲内で変化した。特に、本テスト部の単相流実験で得られた $\beta = 0.003$ をそのまま用いると、CHFR は 17 % 程度の過小評価となる。

以下の解析における混合係数は、単相流領域では大気圧流動試験による実験値を用い、二相流領域ではこの実験値に上述の二相増倍係数 (β/β_0) を乗じた値を用いる。

(2) バルクボイドモデル

前述の Rowe and Angle の実験データに対して感度解析を行なった結果、バルクボイドモデルは二相流条件下のサブチャンネル間流動分布にかなりの影響を与えることが分かった⁽¹³⁾。オリジナルの COBRA コードには、均一モデルと修正 Armand モデル及びスリップモデルが内蔵されており、クオリティの関数として多項式で与えることもできる。一方、ボイド率相関式としては EPRI 相関式⁽¹⁹⁾ が適用範囲が広く、佐田富のボイド率データともよく一致している⁽¹³⁾。また、Zuber-Findlay のボイド率相関式⁽²⁰⁾ も一般によく使用されている。そこで、以上 2 式を COBRA-IV-I に組み込み、オプションとして使用可能とした。

Table 3.3 に、バルクボイドモデルがサブチャンネル解析結果及びCHFRの値に及ぼす影響を示す。この比較結果より、使用するボイド率相関式が異なると、ボイド率の計算値にはかなり大きな影響を及ぼすが、CHFRに及ぼす影響は 2 %以内と比較的小さいことが分かった。これは、比較した実験においては、いずれもボイド率は 0.8 以上で、環状流領域にあるため、ボイド率がCHFに及ぼす影響が小さいと考えられる。

以下の解析におけるボイド率モデルとしては、適用範囲が広く実験値との一致も良い EPRI相関式を用いる。

(3) ロッド摩擦抵抗係数及びグリッドスペーサ抵抗係数

大気圧下での流動実験の結果、グリッドスペーサ以外のロッド部分の摩擦係数の実験値は、レイノルズ数が 10^5 以下では Blasius の式とよく一致していることが分かったので、ロッド摩擦係数としては Blasius の式を用いる。

また、同じく流動試験により、CHF実験の各テスト部で使用したグリッドスペーサの抵抗係数を求めた。Fig. 3.14 にその結果を示す。同図より明らかなように、本実験でのグリッドスペーサ抵抗係数としては 1.0 を用いるのが適当である。

但し、感度解析の結果、ロッド摩擦抵抗係数及びグリッドスペーサ抵抗係数が、局所質量速度やエンタルピーの計算結果に及ぼす影響は極めて小さいことが分かった。

(4) その他の入力条件

軸方向ノード長さは 25 mm とし、サブクールボイドモデルは Levy のモデルを使用し、圧力差に基づく横流れ抵抗係数は 0.5 とした。なお、感度解析の結果、軸方向分割数、サブクールボイドモデル及び横流れ抵抗係数がサブチャンネル出口での流動条件に及ぼす影響は極めて小さいことが分かっている⁽⁷⁾。

3.2.2 局所流動条件を用いたCHF相関式の予測精度

各テスト部について、実験範囲を包含するように 12 ケースを選び、COBRA-IV-I コードによるサブチャンネル解析を実施した。Table 3.4 に、解析の対象とした各ケースの実験条件を示す。付録 D に代表的な COBRA-IV-I 入力データと、各ケースの、質量速度、クオリティ、エンタルピー及びボイド率の計算結果を収録する。Table 3.5 に、各ケースのホットチャンネル出口における質量速度及びクオリティの計算値を、WSC-2, KfK, EPRI-B&W, EPRI-Columbia 及び Katto の各 CHF 相関式に適用して求めた CHFR の値を示す。なお、KfK 相関式については、いわゆるサブチャンネルインバランスファクターを考慮した場合としない場合の両方について求めた。サブチャンネルインバランスファクターとは、相関式を導出する過程のエネルギーバランス式で、サブチャンネル間のエンタルピー移動の効果を考慮するパラメータで、付録 C(2) に定義式を示す。KfK 相関式を本実験のような小規模バンドル体系に適用する際には、このファクターを考慮するのが適当と考えられる。

Table 3.5 り、各テスト部ごとの CHFR の平均値及び標準偏差をまとめると以下のようになる。

CHFRの平均値（標準偏差）

CHF相関式	テスト部A	テスト部B	テスト部C	テスト部D
WSC-2-IF *	1.334 (0.057)	1.513 (0.048)	1.249 (0.070)	1.292 (0.052)
KfK	0.763 (0.028)	0.874 (0.066)	0.819 (0.058)	0.798 (0.060)
KfK-IF *	0.867 (0.045)	0.976 (0.084)	0.903 (0.104)	0.830 (0.074)
EPRI-B&W	0.638 (0.07)	0.672 (0.136)	0.615 (0.124)	0.635 (0.051)
EPRI-Columbia	0.931 (0.278)	2.023 (0.442)	1.378 (0.387)	0.896 (0.158)
Katto	1.238 (0.077)	1.219 (0.055)	1.316 (0.122)	1.281 (0.037)

* IF：サブチャンネルインバランスファクター

Fig. 3. 15 ~ 3. 20 に、各CHF相関式を用いて得られたCHFRの値と、サブチャネル解析の結果得られた局所質量速度との関係を示す。このうち、KfK相関式について見ると、Fig. 3. 16 より、サブチャンネルインバランスファクターを考慮しない場合には、CHFRは約 0.7 ~ 0.9 となっている。一方、サブチャンネルインバランスファクターを考慮したFig. 3. 17 では、CHFR はほぼ 0.8 ~ 1.1 となり、局所質量速度が 1500 kg/s·m² 以上では、実験値を約 15 %過小評価しているものの、比較した相関式の中では実験値との一致は最も良いことが分かった。

3. 3 流量低下時のCHF特性

流量低下非定常CHF実験においては、流量低下速度の指標として、次式で定義する流速減少率FRを用いた。

$$FR = 100 \Delta G / (G_0 \Delta t_{BO}) (\% / s) \quad (7)$$

但し

G_0 = 初期質量速度

ΔG = $G_0 - G_{BO}$

G_{BO} = CHF発生時の質量速度

Δt_{BO} = 流量低下開始からCHFに至る時間

流量低下CHF実験は7本ロッドテスト部BとCのみについて実施した。付録Bに収録した実験のうち、代表的な実験28ランについて、COBRA-IV-Iコードによる非定常サブチャンネル解析を行った。解析条件は定常計算と同様である。なお、ここで入口流量については、2.3.1項で述べたように、流量計の一次遅れの補正を行った結果を用いた。

Table 3. 6 に、解析の対象とした各実験の初期条件、(7)式の Δt_{BO} 、 G_{BO} 、FRの値、DNB発生時におけるホットチャンネル出口の質量速度及びクオリティを示す。また、3.2節で述べたように、定常CHF実験の結果、KfK相関式が最も実験との一致が良好であった。そこで、局所流动条件計算値を本相関式に適用して求めたCHFの値と実験値との比(CHFR)も同表に示す。

Fig. 3. 21 及び 3. 22 に、流量低下からDNBに至る時間が2秒の場合(Run 2517, FR = 27.7 %/s) 及び16秒の場合(Run 2521, FR = 3.7 %/s)について、COBRA-IV-Iコードで計算した、中心(Channel 1)、側面(Channel 7)及びコーナー(Channel 8)の各サブチャンネル出口における質量速度及びエンタルピーの変化を示す。両試験は、同一の圧力、入口温度、初

期質量速度及び熱流束の条件下で実施した。両図の比較より、流速減少率が大きいRun 2517の方が、DNB発生時の中心サブチャンネルの出口における質量速度は大きく、エンタルピーは小さくなっている。このことは、流速減少率が大きい場合には、定常時のDNB発生条件に相当する局所流動条件に達するよりも早くDNBに至ることを示唆している。

流量低下に伴うDNB発生の予測精度を調べるため、流量低下DNB発生時のホットサブチャンネル出口の流動条件計算結果をKfKのCHF相関式に適用して求めたCHFRと、定常DNBに相当する条件下でのCHFRの比($(CHFR)^t / (CHFR)^s$)を流速減少率(FR)に関してプロットした結果をFig. 3. 23に示す。同図より、FRが6%/s以下では、過渡時と定常時のDNB特性に差は認められないが、FRがそれ以上になると、過渡時のCHFRが定常時よりも大きくなる傾向にあり、FRが30%/s以上では、 $(CHFR)^t / (CHFR)^s$ の最大値は約1.18で一定となる。

以上の結果より、流速減少率が6%/s以上の流量低下過渡時には、定常時と同一の局所流動条件でDNBが発生するとした現行の安全評価上の仮定は必ずしも安全側ではないことが分かった。但し、その場合でも、予測精度のマージンを20%程度とっておけば、現行の評価モデルが適用できると推察される。

本実験は、高転換軽水炉の運転圧力の約1/4に相当する4 MPaの圧力下で実施した。DNB特性は圧力にも強く依存するので、今後実炉圧力下での流量低下CHF実験を実施し、過渡時のDNB発生条件の定量的予測手法を改良する必要がある。

Table 3.1 Input parameters for COBRA-IV-I analysis

Subcool void model	Levy
Bulk void model	EPRI ⁽¹⁾
Rod friction coefficient	Blasius
Spacer loss coefficient	1.0 ⁽²⁾
Heat transfer correlations	RELAP-4 package
Cross flow resistance	0.5
Cross flow momentum factor	0.5
Turbulent momentum factor	0.0
Cross flow axial velocity	$(U(j) + U(i)) / 2$
Turbulent mixing coefficient	single-phase : 0.003 or 0.004 ⁽³⁾ two-phase : $f(\alpha)$ ⁽⁴⁾

(1) Chexel, B and Lellouche, G., EPRI NP-3989-st, (1985).

This correlation is newly implemented in COBRA-IV-I

(2) Based on pressure drop experiments

(3) Based on thermal mixing experiments

(4) See Section 3.2.1 (1)

Table 3.2 Effect of mixing coefficient on subchannel analysis results and CHFR

Test B (7-rods, L = 1.0 m, P/D = 1.2)
 Exit of Channel 1 (hot subchannel)
 $\text{CHFR} = (\text{CHF})_{\text{cal}} / (\text{CHF})_{\text{meas.}}$.
 H = enthalpy (kJ/kg)
 G = mass velocity (kg/s. m²)

Run	Mixing coefficient for COBRA-IV-I						$\beta = f(\alpha)^{**}$		
	$\beta = 0.001$			$\beta = 0.003$					
	H	G	CHFR	H	G	CHFR	H	G	CHFR
2316	1721	1467	0.794	1623	1626	0.868	1420	2097	1.069
2317	1911	962	0.813	1736	1118	0.922	1467	1500	1.142
2318	1969	911	0.833	1790	1051	0.943	1509	1391	1.168
2322	2027	821	0.888	1880	913	0.980	1589	1178	1.123
2323	2045	759	0.916	1884	851	1.021	1586	1105	1.267
2326	2129	604	0.993	1957	676	1.114	1636	875	1.399
Average of $(\text{CHFR}) / (\text{CHFR}) \beta = f(\alpha)$									
				0.748		0.835		1.035	

* $(\text{CHF})_{\text{cal}}$ = calculated by KfK correlation (with subchannel imbalance factor)

** α 0.0 0.15 0.3 0.8 1.0
 β 0.003 0.003 0.012 0.012 0.003

Table 3.3 Effect of bulk void fraction models on subchannel analysis results and CHFR

Test B (7-rods, L = 1.0 m, P/D = 1.2)

Exit of Channel 1 (hot subchannel)

CHFR = $(CHF)^*$ \times $(CHF)_{EPR1}$. α = void fractionG = mass velocity (kg/s.m²)

Run	Void fraction model								
	Homogeneous			Modified Armand			Zuber-Findlay		
	α	G	CHFR	α	G	CHFR	α	G	CHFR
2316	0.912	2035	1.055	0.781	2287	1.051	0.794	2317	1.064
2317	0.925	1446	1.129	0.797	1652	1.114	0.803	1685	1.131
2318	0.936	1326	1.139	0.809	1509	1.129	0.812	1545	1.146
2322	0.951	1102	1.155	0.829	1257	1.167	0.825	1289	1.178
2323	0.951	1035	1.209	0.828	1181	1.217	0.824	1211	1.229
2326	0.958	813	1.319	0.839	932	1.339	0.829	957	1.351
Average of $(CHF)^*$ \times $(CHF)_{EPR1}$				1.001		1.020		1.013	

* $(CHF)^*$ = calculated by KfK correlation (with subchannel imbalance factor)

Table 3.4 CHF test conditions for COBRA-IV-I analysis

(1) Test A

Run No	Exit pressure (MPa)	Inlet temperature (K)	Mass velocity (kg/s. m ²)	Average exit quality	C. H. F. (10 ⁶ w/m ²)
306	3.93	467.9	1190	0.244	1.90
504	3.93	501.5	2025	0.199	2.13
510	3.93	496.6	2720	0.139	2.35
512	3.93	502.7	2980	0.139	2.38
517	3.88	501.5	3280	0.126	2.47
520	3.93	497.8	4030	0.087	2.58
521	3.93	501.5	4170	0.097	2.66
523	3.91	501.0	2430	0.171	2.29
610	3.94	452.0	1090	0.243	1.92
611	3.93	447.6	1330	0.201	2.18
612	3.92	455.7	1850	0.160	2.56
616	3.93	458.6	2500	0.104	2.82

Table 3.4 (continued)

(2) Test B

Run No	Exit pressure (MPa)	Inlet temperature (K)	Mass velocity (kg/s. m ²)	Average exit quality	C. H. F. (10 ⁶ w/m ²)
2004	3.88	487.6	1258	0.182	1.658
2113	3.93	474.1	1701	0.118	2.032
2212	3.93	434.9	1582	0.057	2.192
2310	3.93	488.8	2144	0.116	2.153
2312	3.93	492.5	2319	0.117	2.227
2315	3.93	495.6	2446	0.117	2.249
2316	3.93	494.4	2674	0.101	2.304
2317	3.93	478.5	1988	0.108	2.173
2318	3.93	485.1	1802	0.128	1.986
2322	3.93	497.3	1481	0.173	1.722
2323	3.93	493.7	1397	0.166	1.640
2326	3.93	494.4	1103	0.187	1.391

Table 3.4 (continued)

(3) Test C

Run No	Exit pressure (MPa)	Inlet temperature (K)	Mass velocity (kg/s. m ²)	Average exit quality	C. H. F. (10 ⁶ W/m ²)
3313	3.93	508.1	1602	0.173	2.080
3404	3.93	469.8	1162	0.127	1.861
3407	3.93	467.9	1445	0.120	2.305
3410	3.93	478.9	1830	0.114	2.540
3412	3.93	505.2	2131	0.130	2.311
3415	3.93	503.2	2498	0.114	2.552
3417	3.93	504.4	2650	0.109	2.585
3419	3.93	504.4	2869	0.101	2.655
3421	3.93	504.4	3011	0.098	2.735
3526	3.93	482.4	2333	0.093	2.878
3528	3.93	418.7	907	0.117	2.152
3529	3.93	420.6	1212	0.082	2.578

Table 3.4 (continued)

(4) Test D

Run No	Exit pressure (MPa)	Inlet temperature (K)	Mass velocity (kg/s. m ²)	Average exit quality	C. H. F. (10 ⁶ w/m ²)
4203	3.93	491.9	1162	0.177	2.441
4204	3.93	498.5	1503	0.165	2.795
4206	3.88	503.0	2155	0.138	3.306
4208	3.88	498.5	2728	0.108	3.788
4210	3.88	501.7	3074	0.101	3.893
4212	3.88	502.2	3310	0.096	4.026
4214	3.88	499.8	3573	0.080	4.079
4216	3.88	502.2	3857	0.078	4.147
4218	3.88	500.5	4045	0.070	4.226
4220	3.88	502.2	4267	0.069	4.269
4231	3.88	468.7	3433	0.028	4.748
4233	3.67	474.0	3692	0.033	4.585

(1) Test A
 $P = 3.9 \text{ MPa}$

Table 3.5 CHF ratios using local fluid conditions
 - Comparison of CHF correlations -

Run	Fluid conditions			(CHF) _{cal.} ./ (CHF) _{meas.} using local conditions					
	Average		Local*	CHF correlations			EPRI -Columbia		
	\bar{G}_{out} (kg/s. m ²)	\bar{X}_{out} (-)	G_{out} (kg/s. m ²)	X_{out} (-)	WSC-2 -I.F.**	KfK	KfK -I.F.**	EPRI -B&W	Katto -Annuli
306	1192	0.247	898	0.462	1.274	0.780	0.930	0.571	0.487
504	2025	0.202	1656	0.322	1.334	0.758	0.824	0.616	0.819
510	2721	0.142	2260	0.228	1.401	0.776	0.849	0.674	1.171
512	2980	0.143	2513	0.220	1.373	0.766	0.821	0.687	1.092
517	3283	0.130	2780	0.199	1.375	0.772	0.830	0.704	1.119
520	4031	0.090	3433	0.145	1.423	0.819	0.899	0.747	1.267
521	4170	0.100	3577	0.154	1.356	0.786	0.851	0.739	1.116
523	2430	0.175	2010	0.274	1.340	0.749	0.809	0.638	1.341
610	1089	0.245	798	0.489	1.240	0.770	0.945	0.563	1.207
611	1335	0.205	978	0.419	1.268	0.744	0.911	0.566	1.171
612	1853	0.164	1393	0.329	1.283	0.712	0.854	0.567	1.158
616	2501	0.106	1909	0.226	1.344	0.729	0.876	0.585	1.148
	Average \pm Standard deviation		1.334 ± 0.057		0.763 ± 0.028		0.867 ± 0.045		1.238 ± 0.077
									1.238 ± 0.278

* Local conditions at the hot subchannel exit were calculated by COBRA-IV-I code.

** I.F. = subchannel imbalance factor

(2) Test B
 $P = 3.9 \text{ MPa}$

Table 3.5 (continued)

Run	Fluid conditions			(CHF) _{cal.} / (CHF) _{meas.} using local conditions												
	Average		Local*	WSC-2			KfK			EPRI -B&W		EPRI -Columbia		Katto -Annuli		
	\bar{G}_{out} (kg/s. m ²)	$\bar{\chi}_{out}$ (-)	G_{out} (kg/s. m ²)	χ_{out} (-)	-I.F.**		KfK	-I.F.**	KfK	-B&W		EPRI -B&W		EPRI -Columbia		Katto -Annuli
2004	1258	0.182	964	0.325		1.551	0.928		1.050		0.643		2.319		1.250	
2113	1701	0.118	1310	0.230		1.536	0.879		1.012		0.638		2.275		1.242	
2212	1584	0.053	1011	0.211		1.490	0.850		1.039		0.434		2.825		1.169	
2310	2140	0.122	1616	0.238		1.484	0.832		0.912		0.635		1.695		1.204	
2312	2315	0.123	1764	0.233		1.454	0.812		0.881		0.632		1.544		1.186	
2315	2447	0.119	1878	0.223		1.454	0.806		0.870		0.635		1.533		1.186	
2316	2669	0.107	2059	0.203		1.466	0.816		0.880		0.648		1.550		1.216	
2317	1988	0.109	1466	0.232		1.503	0.838		0.945		0.615		1.902		1.201	
2318	1798	0.133	1340	0.263		1.516	0.865		0.960		0.636		1.911		1.221	
2322	1481	0.174	1110	0.324		1.506	0.897		0.981		0.629		1.856		1.226	
2323	1396	0.171	1043	0.321		1.553	0.939		1.034		0.650		2.153		1.274	
2326	1101	0.191	817	0.359		1.589	1.030		1.147		0.670		2.718		1.355	
Average \pm Standard deviation				1.513 \pm 0.048		0.874 \pm 0.066	0.976 \pm 0.084		0.672 \pm 0.136		2.023 \pm 0.442		1.219 \pm 0.055			

* Local conditions at the hot subchannel exit were calculated by COBRA-IV-I code.
 ** I.F. = subchannel imbalance factor

(3) Test C
 $P = 3.9 \text{ MPa}$

Table 3.5 (continued)

JAERI-M 90-044

Run	Fluid conditions			$(\text{CHF})_{\text{cal.}} / (\text{CHF})_{\text{meas.}}$ using local conditions						
	Average	Local*		CHF correlations						
	\bar{G}_{out} (kg/s. m^2)	\bar{X}_{out} (-)	G_{out} (kg/s. m^2)	X_{out} (-)	WSC-2 -I.F.**	KfK -I.F.**	KfK -I.F.**	EPR -Columbia -B&W	EPR -Columbia -B&W	Katto -Annuli
3313	1602	0.173	1078	0.374	1.255	0.860	0.904	0.600	1.047	1.357
3404	1160	0.121	705	0.365	1.336	0.967	1.114	0.632	2.347	1.472
3407	1444	0.115	872	0.357	1.240	0.829	0.944	0.567	1.521	1.313
3410	1830	0.109	1137	0.320	1.233	0.785	0.861	0.565	1.256	1.292
3412	2131	0.131	1445	0.292	1.318	0.841	0.875	0.641	1.245	1.403
3415	2498	0.115	1694	0.264	1.286	0.803	0.831	0.634	1.139	1.367
3417	2650	0.110	1811	0.250	1.295	0.804	0.829	0.644	1.154	1.377
3419	2868	0.102	1970	0.233	1.298	0.804	0.826	0.651	1.155	1.387
3421	3011	0.100	2073	0.228	1.279	0.793	0.813	0.649	1.103	1.375
3526	2333	0.092	1467	0.273	1.206	0.739	0.795	0.546	1.120	1.261
3528	907	0.115	502	0.464	1.113	0.845	1.079	0.528	1.796	1.054
3529	1212	0.080	652	0.387	1.129	0.761	0.959	0.428	1.653	1.114
Average \pm Standard deviation				1.249 ± 0.070	0.819 ± 0.058	0.903 ± 0.104	0.615 ± 0.124	1.378 ± 0.387	1.316 ± 0.122	

* Local conditions at the hot subchannel exit were calculated by COBRA-IV-I code.

** I.F. = subchannel imbalance factor

(4) Test D
 $P = 3.9 \text{ MPa}$

Table 3.5 (continued)

JAERI-M 90-044

Run	Fluid conditions			(CHF) _{cal.} / (CHF) _{meas.} using local conditions						
	Average	Local*		CHF correlations			EPR -Columbia			
	\bar{G}_{out} (kg/s. m ²)	X_{out} (-)	G_{out} (kg/s. m ²)	X_{out} (-)	WSC-2 -I.F.**	KfK -I.F.**	KfK -I.F.**	EPR -B&W	EPR -B&W	
4203	1162	0.187	880	0.367	1.406	0.959	1.028	0.611	1.325	1.347
4204	1503	0.174	1165	0.326	1.373	0.872	0.914	0.605	1.055	1.284
4206	2155	0.146	1718	0.262	1.332	0.795	0.818	0.621	0.893	1.240
4208	2727	0.115	2179	0.216	1.286	0.762	0.785	0.628	0.832	1.232
4210	3075	0.108	2494	0.196	1.273	0.759	0.777	0.648	0.809	1.243
4212	3311	0.102	2696	0.185	1.253	0.751	0.768	0.652	0.783	1.239
4214	3574	0.087	2911	0.164	1.274	0.776	0.796	0.671	0.827	1.289
4216	3857	0.085	3175	0.155	1.256	0.775	0.792	0.686	0.796	1.292
4218	4046	0.076	3322	0.145	1.256	0.785	0.805	0.689	0.804	1.313
4220	4267	0.075	3530	0.140	1.242	0.786	0.804	0.701	0.782	1.317
4231	3433	0.035	2501	0.145	1.253	0.757	0.821	0.526	0.887	1.264
4233	3692	0.040	2736	0.135	1.305	0.795	0.855	0.581	0.958	1.309
Average \pm Standard deviation					1.292 ± 0.052	0.798 ± 0.060	0.830 ± 0.074	0.635 ± 0.051	0.896 ± 0.158	1.281 ± 0.037

* Local conditions at the hot subchannel exit were calculated by COBRA-IV-I code.

** I.F. = subchannel imbalance factor

(1) Test B

Table 3.6 COBRA-IV-I results and CHFR's for flow reduction CHFR experiments

Run	Test conditions				Test Results			COBRA-IV-I results			CHFR at Δt_{BO}	
	P (MPa)	Tin (°C)	\bar{G}_0 (kg/s. m ²)	q ₀	Δt_{BO} (s)	\bar{G}_{BO}	FR*	G_{BO}^{out} (kg/s. m ²)	X_{BO}^{out} (-)	KFK	KfK-1.F.**	
2509	3.93	187	3021	1.825	1.1	1555	44.1	1220	0.167	1.016	1.217	
2511	3.93	191	2989	1.823	2.6	1375	20.8	1140	0.216	0.979	1.170	
2512	3.93	189	3010	1.826	4.3	1288	13.3	1028	0.254	0.950	1.135	
2513	3.93	193	2963	1.815	7.7	1328	7.17	1006	0.272	0.936	1.099	
2514	3.93	188	2990	1.819	16.6	1175	3.66	862	0.331	0.901	1.068	
2516	3.83	173	2972	1.827	1.1	1429	47.2	997	0.159	0.989	1.226	
2517	3.86	175	3009	1.820	2.0	1345	27.7	1032	0.179	0.999	1.238	
2519	3.76	173	3012	1.825	4.6	1175	13.3	944	0.240	0.970	1.207	
2521	3.78	171	3033	1.819	16.0	1234	3.71	887	0.254	0.957	1.171	
2524	3.91	214	2972	1.814	0.9	1504	54.9	1381	0.229	0.955	1.082	
2525	3.93	216	2937	1.812	1.6	1536	29.8	1315	0.250	0.934	1.046	
2526	3.93	218	2915	1.813	2.3	1568	20.1	1293	0.263	0.920	1.024	
2527	3.93	211	2961	1.812	3.7	1483	16.4	1160	0.278	0.918	1.037	
2528	3.93	217	2907	1.812	7.5	1424	6.80	1084	0.330	0.878	0.979	
2529	3.93	215	2901	1.803	14.6	1390	3.57	1038	0.339	0.879	0.983	

* FR = Flow reduction rate $(100 (\bar{G}_0 - \bar{G}_{BO}) / (\bar{G}_0 \Delta t_{BO}))$

** I.F. = subchannel imbalance factor

(2) Test C

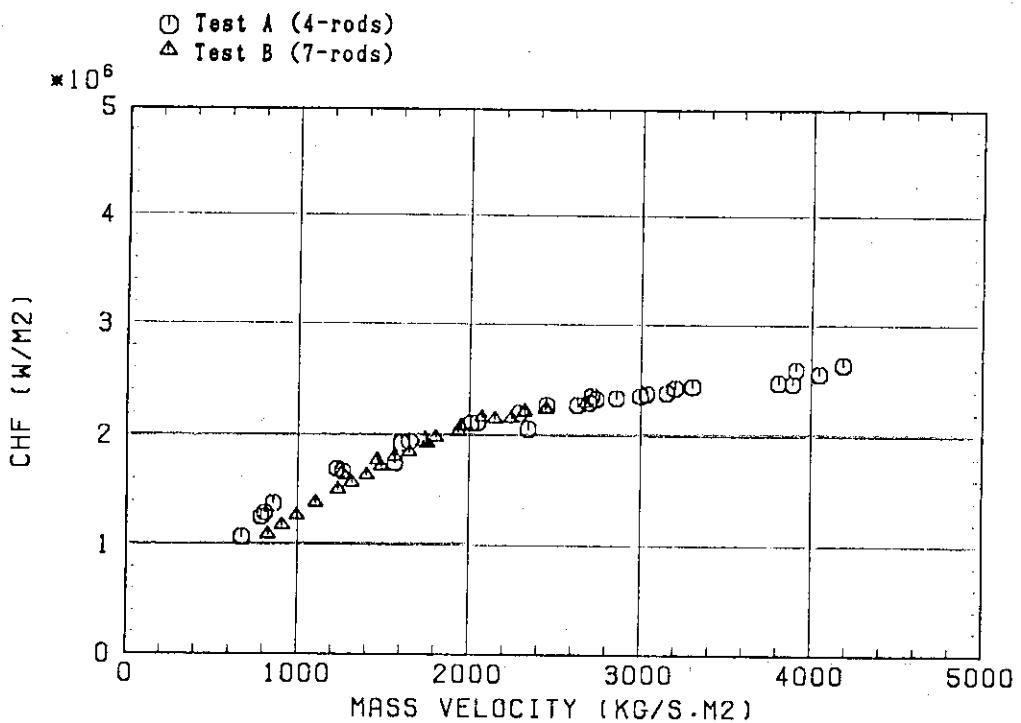
Table 3.6 (continued)

Run	Test conditions				Test Results			COBRA-IV-I results		CHFR at Δt_{bo}	
	P (MPa)	T _{in} (°C)	\bar{G}_0	q ₀	Δt_{bo} (s)	G _{bo}	FR*	\bar{G}_{bo}^{out} (kg/s. m ²)	X _{bo} ^{out} (kg/s. m ²)	KfK	- CHF correlation -
3201	3.93	222	2988	1.379	17.3	893	4.05	583	0.422	1.229	1.369
3202	3.93	223	3043	1.374	6.5	1025	10.2	692	0.341	1.280	1.418
3204	3.93	227	3006	1.365	4.2	1199	14.3	848	0.274	1.333	1.453
3205	3.91	228	2983	1.367	3.6	1267	16.0	907	0.257	1.347	1.461
3206	3.91	228	2947	1.368	2.8	1158	21.7	836	0.286	1.322	1.443
3207	3.91	228	2930	1.356	2.0	1336	27.2	984	0.229	1.383	1.496
3208	3.91	229	2875	1.361	1.1	1368	47.7	1015	0.225	1.383	1.491
3301	3.93	201	3174	1.578	25.4	885	2.84	544	0.446	1.109	1.284
3302	3.89	200	3122	1.572	9.3	946	7.49	599	0.383	1.146	1.334
3303	3.86	199	3325	1.578	4.8	1038	14.3	683	0.313	1.185	1.379
3304	3.86	200	3349	1.559	2.5	1182	25.9	803	0.229	1.246	1.446
3305	3.87	199	2982	1.569	1.3	1417	40.4	868	0.169	1.266	1.454
3306	3.88	196	3098	1.561	1.1	1360	51.0	792	0.176	1.252	1.454

* FR = Flow reduction rate $(100 (\bar{G}_0 - \bar{G}_{bo}) / (\bar{G}_0 \Delta t_{bo}))$

** I.F. = subchannel imbalance factor

TIN=230 °C



TIN=200 °C

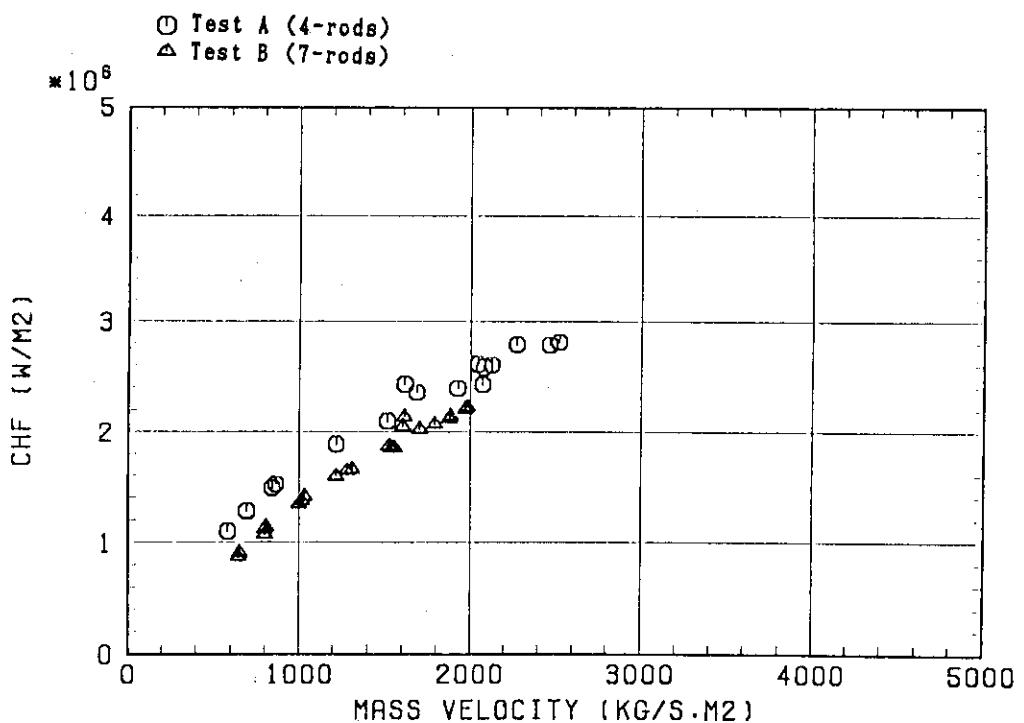
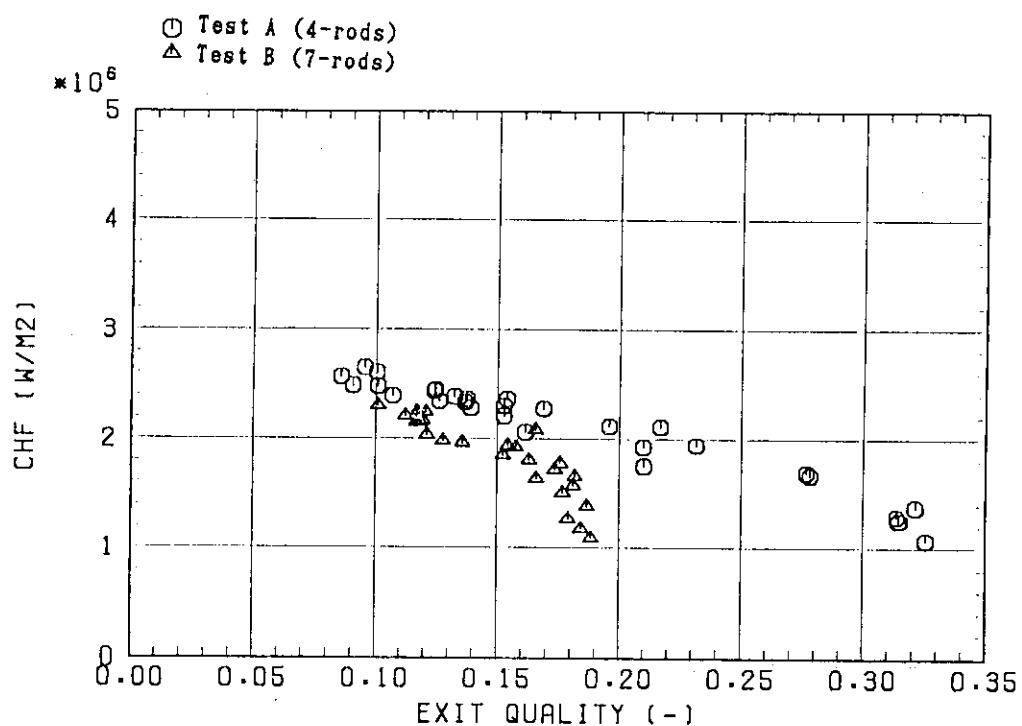


Fig. 3.1 Effect of rod bundle size on CHF vs. bundle-averaged mass velocity

TIN=230 °C



TIN=200 °C

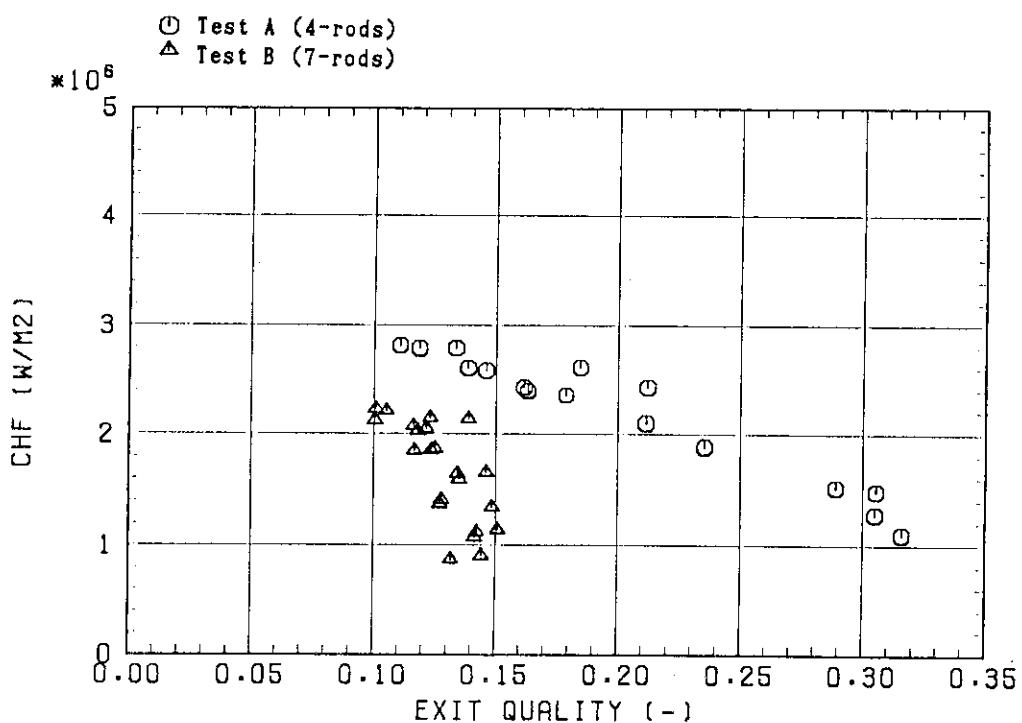


Fig. 3.2 Effect of rod bundle size on CHF vs. bundle-averaged exit quality

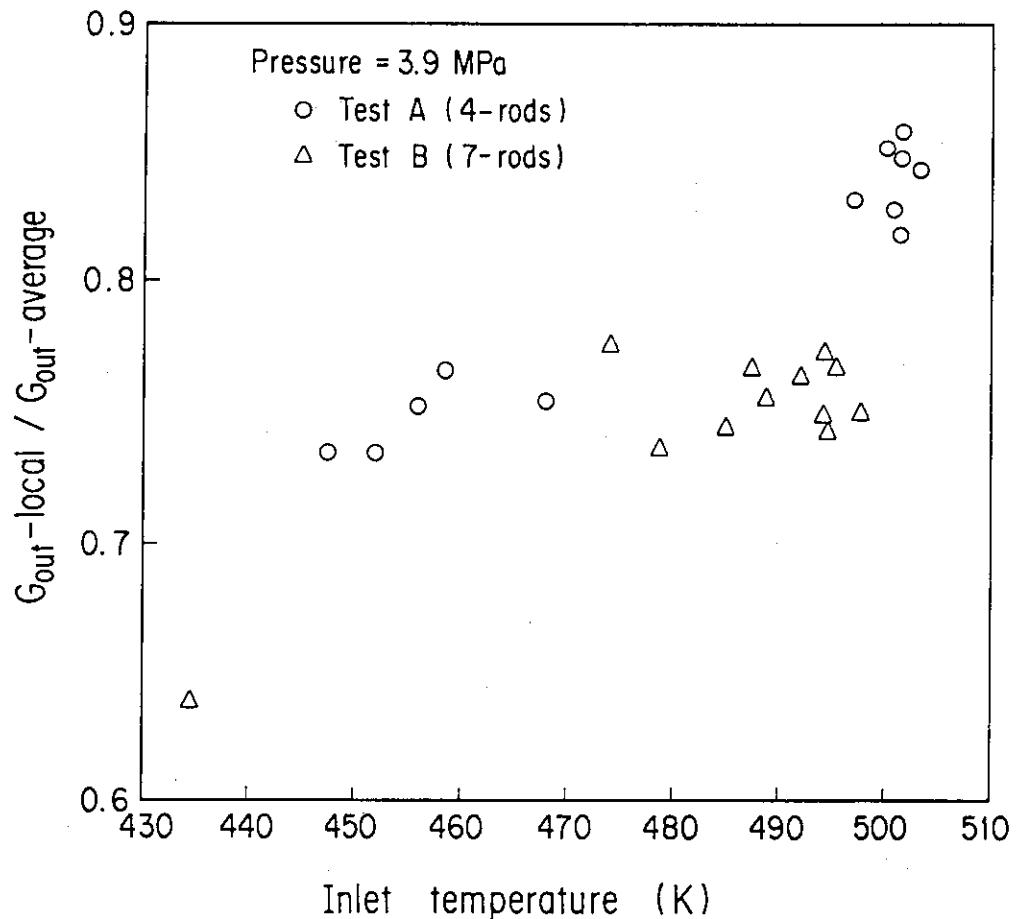
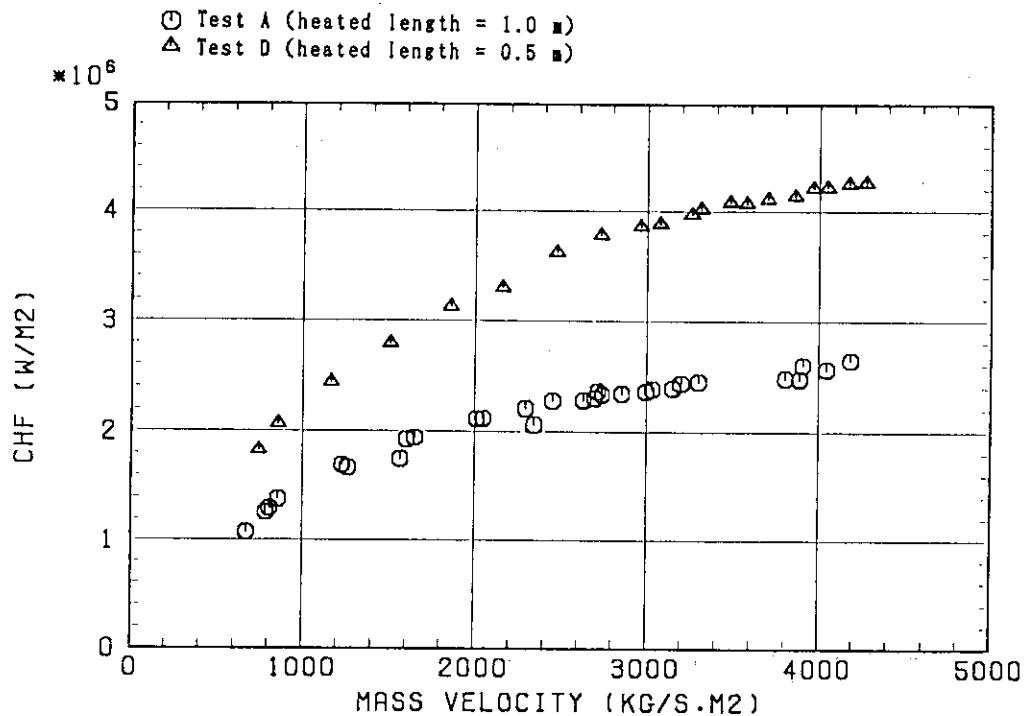


Fig. 3.3 Effect of inlet water temperature on mass velocity distribution

TIN=230 °C



TIN=200 °C

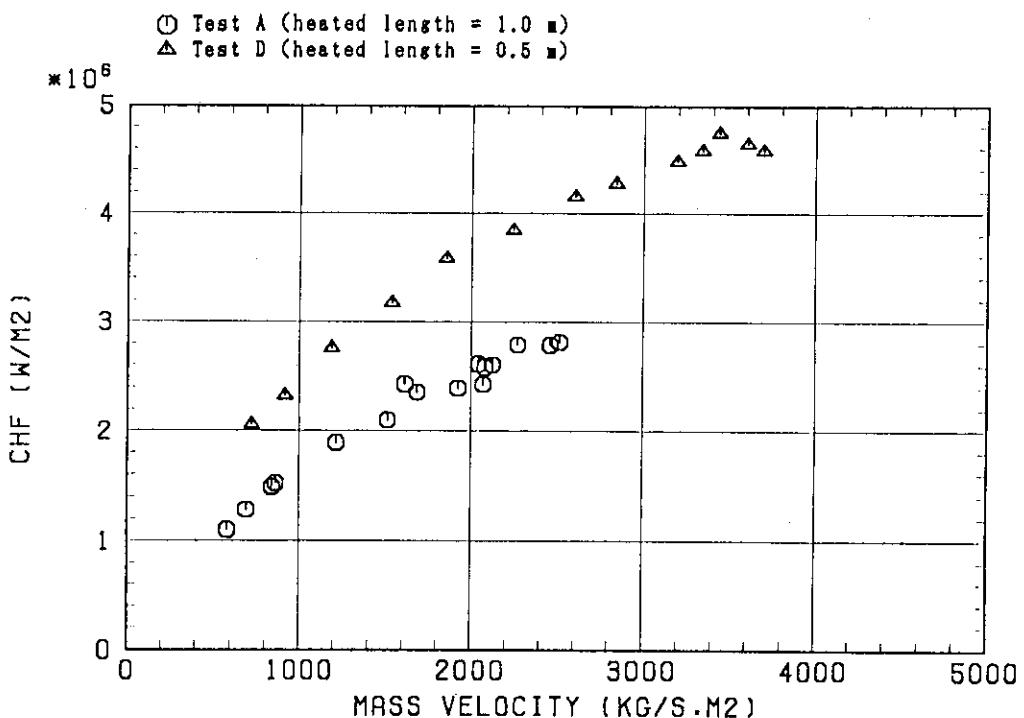
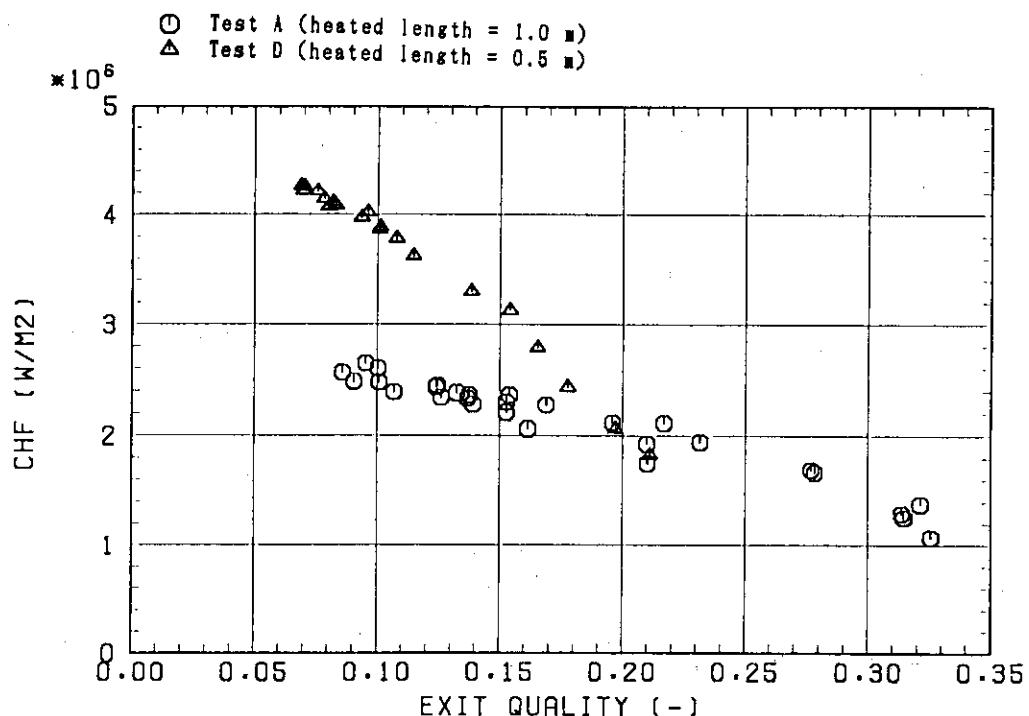


Fig. 3.4 Effect of heated length on CHF vs. bundle-averaged mass velocity

TIN=230 °C



TIN=200 °C

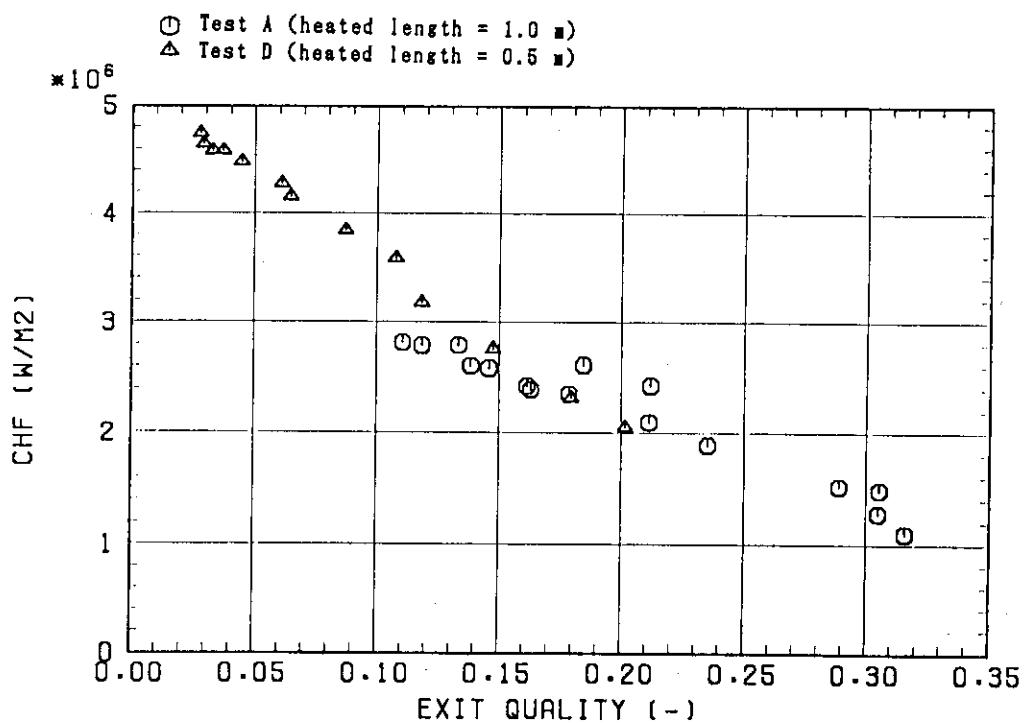
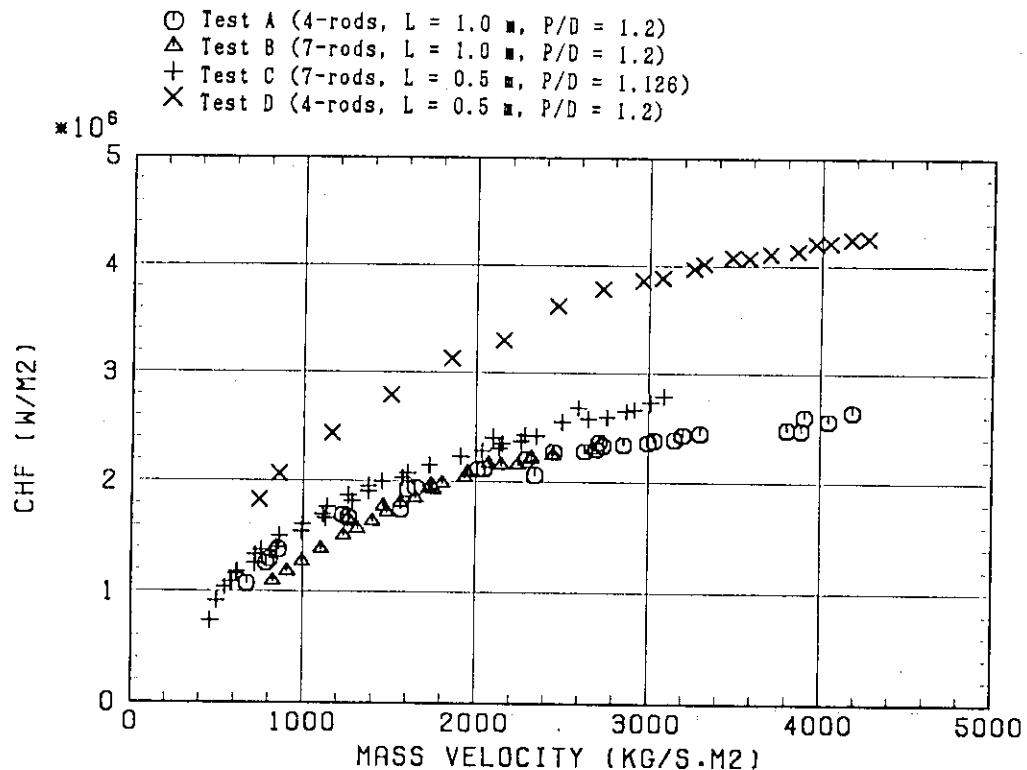


Fig. 3.5 Effect of heated length on CHF vs. bundle-averaged exit quality

$P = 3.9 \text{ MPa}$
 $T_{IN} = 230 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$P = 3.9 \text{ MPa}$
 $T_{IN} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

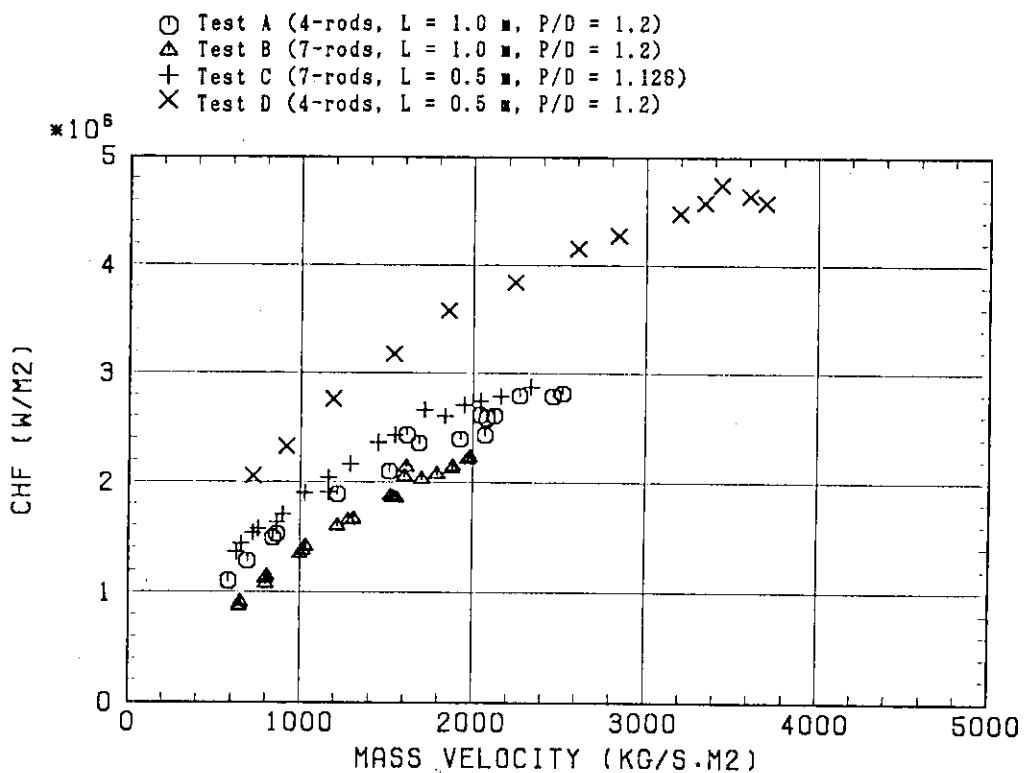
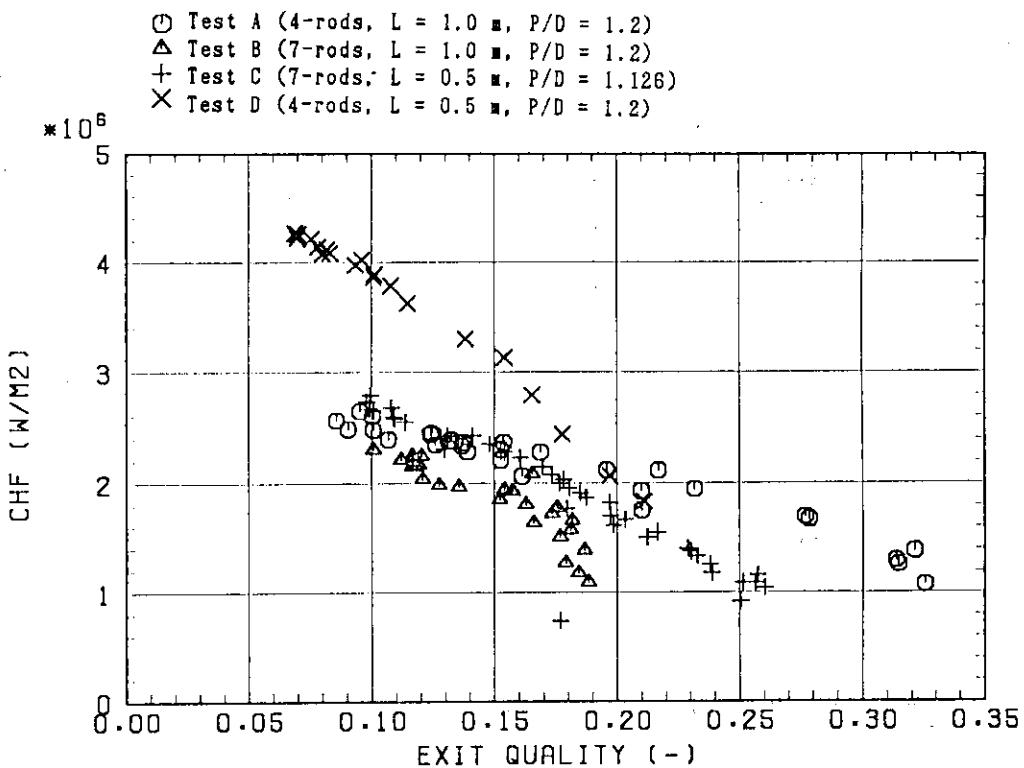


Fig. 3.6 Measured CHF vs. bundle-averaged mass velocity
(Comparison among Tests A, B, C, and D)

$P=3.9$ MPA
 $TIN=230$ C



$P=3.9$ MPA
 $TIN=200$ C

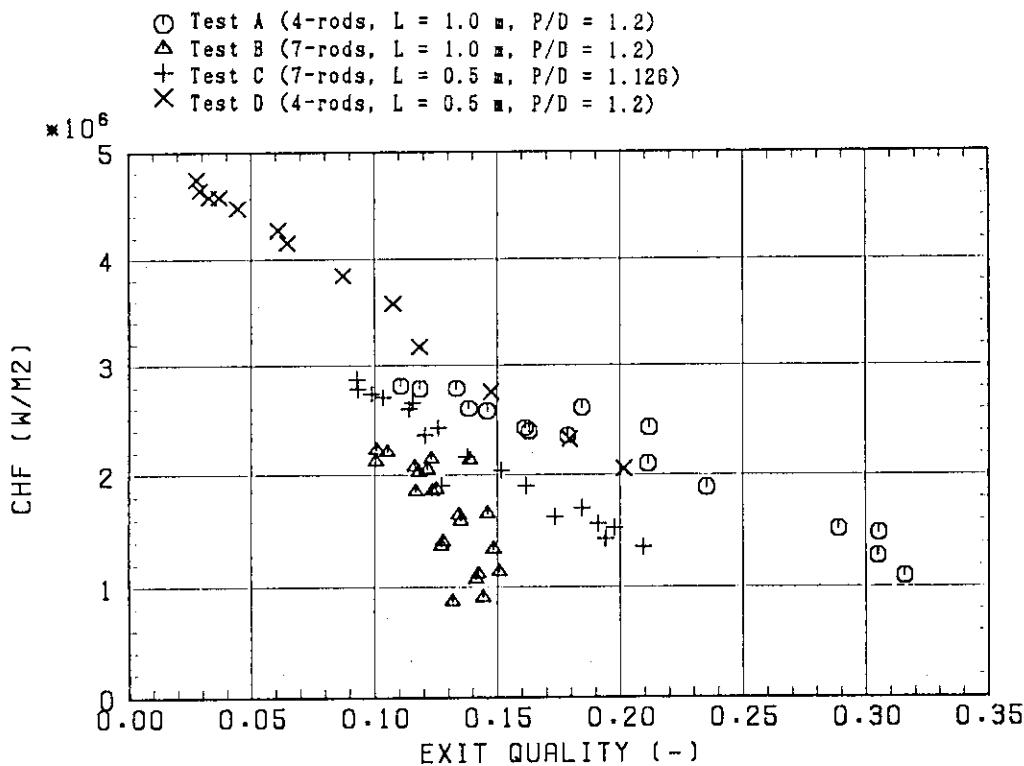


Fig. 3.7 Measured CHF vs. bundle-averaged exit quality
(Comparison among Tests A, B, C, and D)

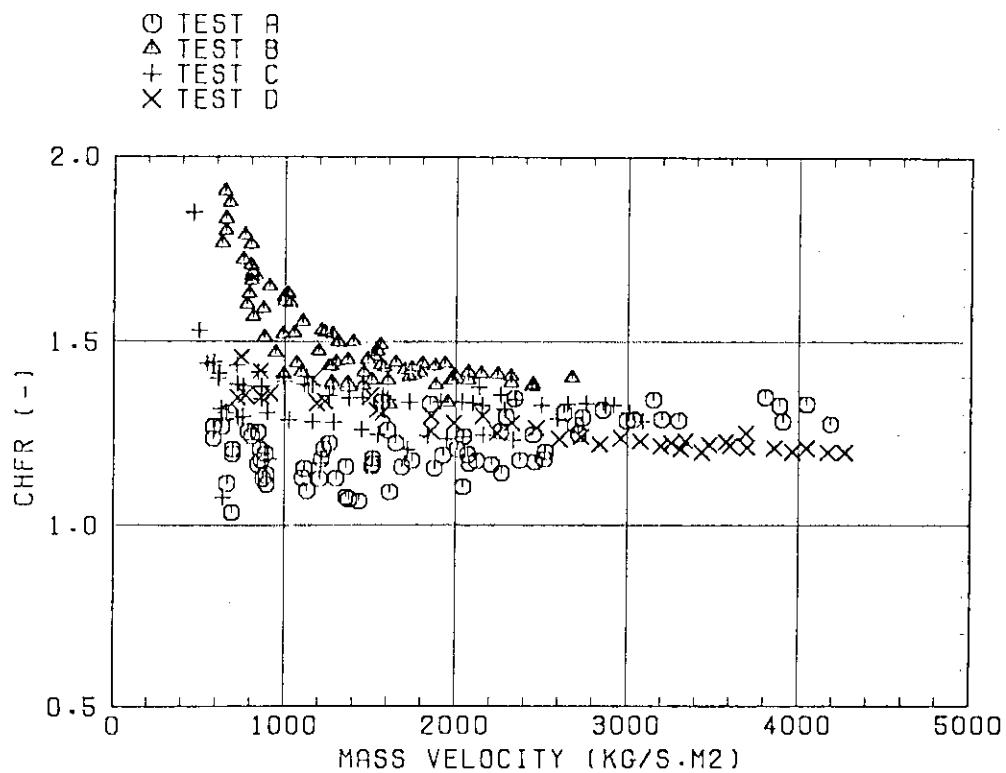


Fig. 3.8 Predicted to measured CHF ratio using bundle averaged conditions (WSC-2-triangular correlation)

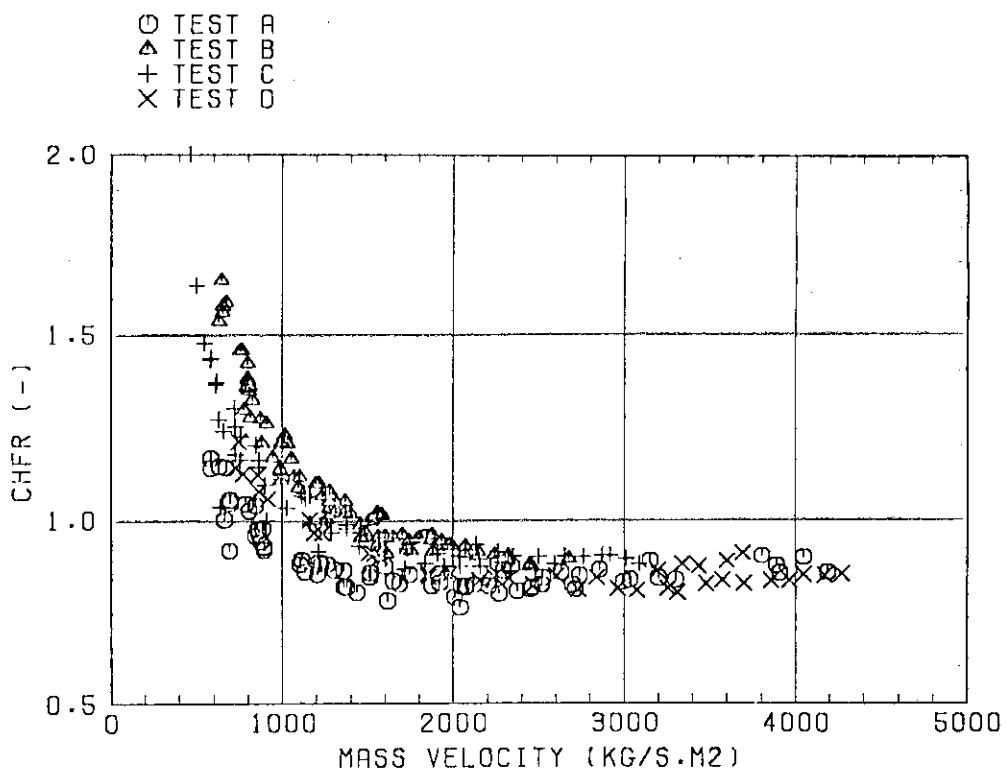


Fig. 3.9 Predicted to measured CHF ratio using bundle averaged conditions (KfK correlation)

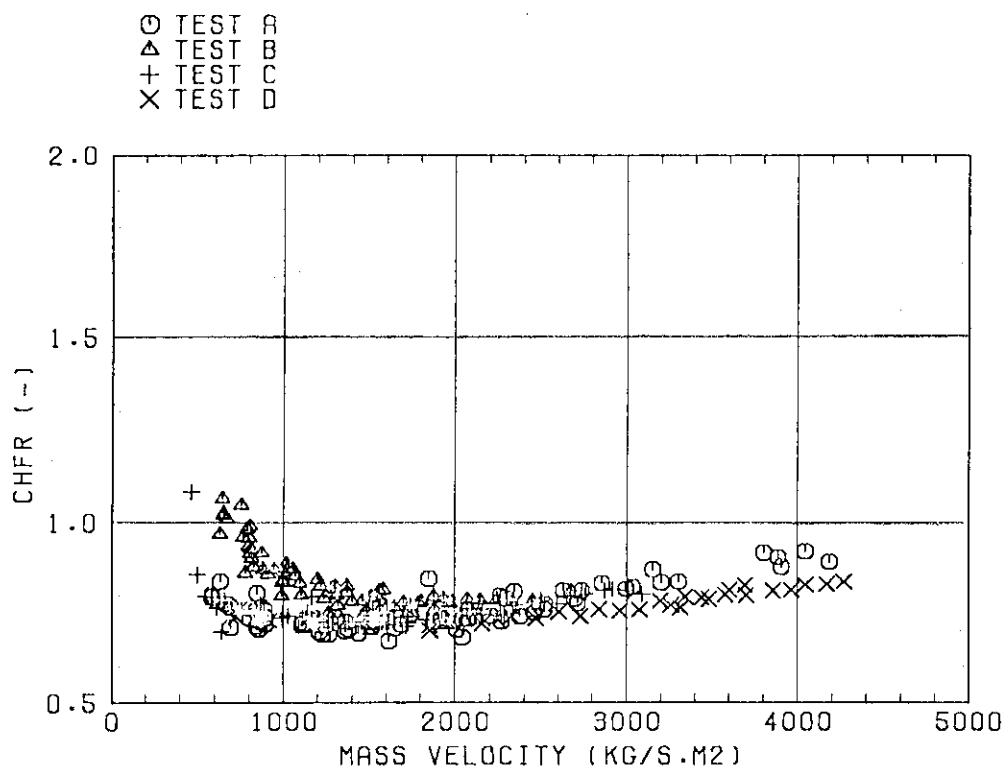


Fig. 3.10 Predicted to measured CHF ratio using bundle averaged conditions (EPRI-V&W correlation)

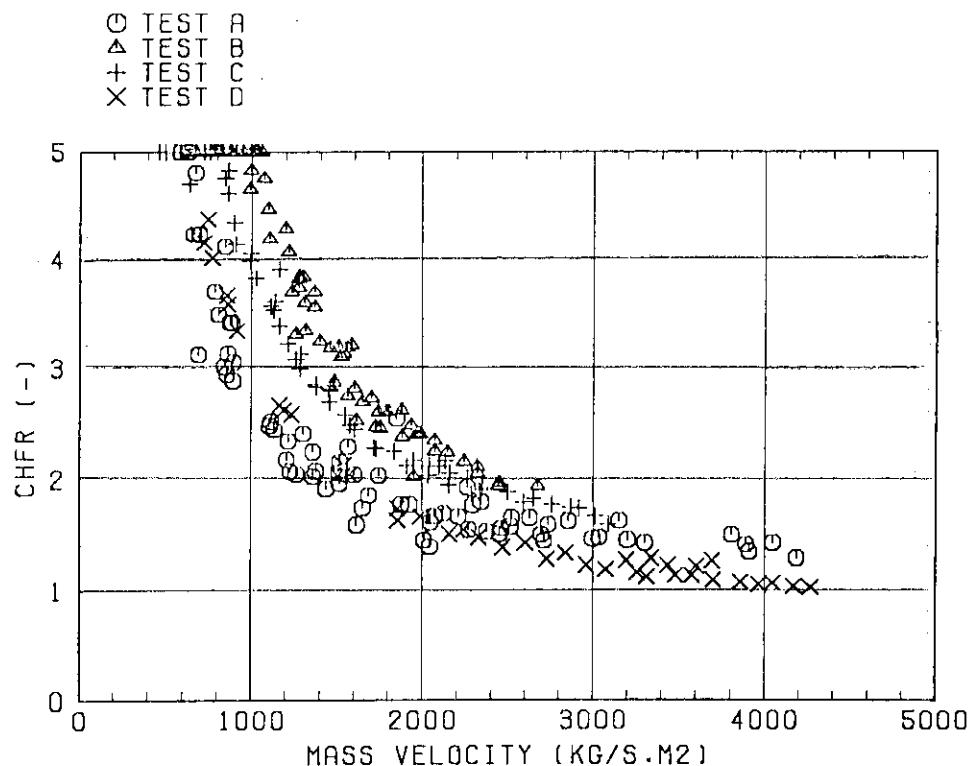


Fig. 3.11 Predicted to measured CHF ratio using bundle averaged conditions (EPRI-Columbia correlation)

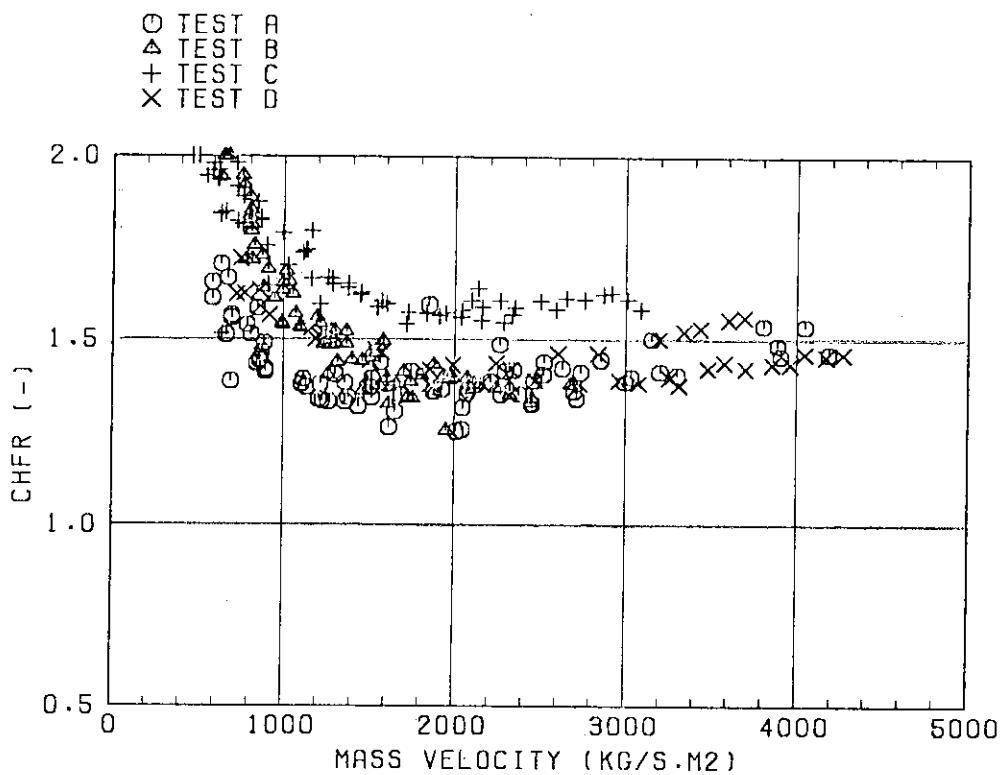


Fig. 3.12 Predicted to measured CHF ratio using bundle averaged conditions (Katto-Annuli correlation)

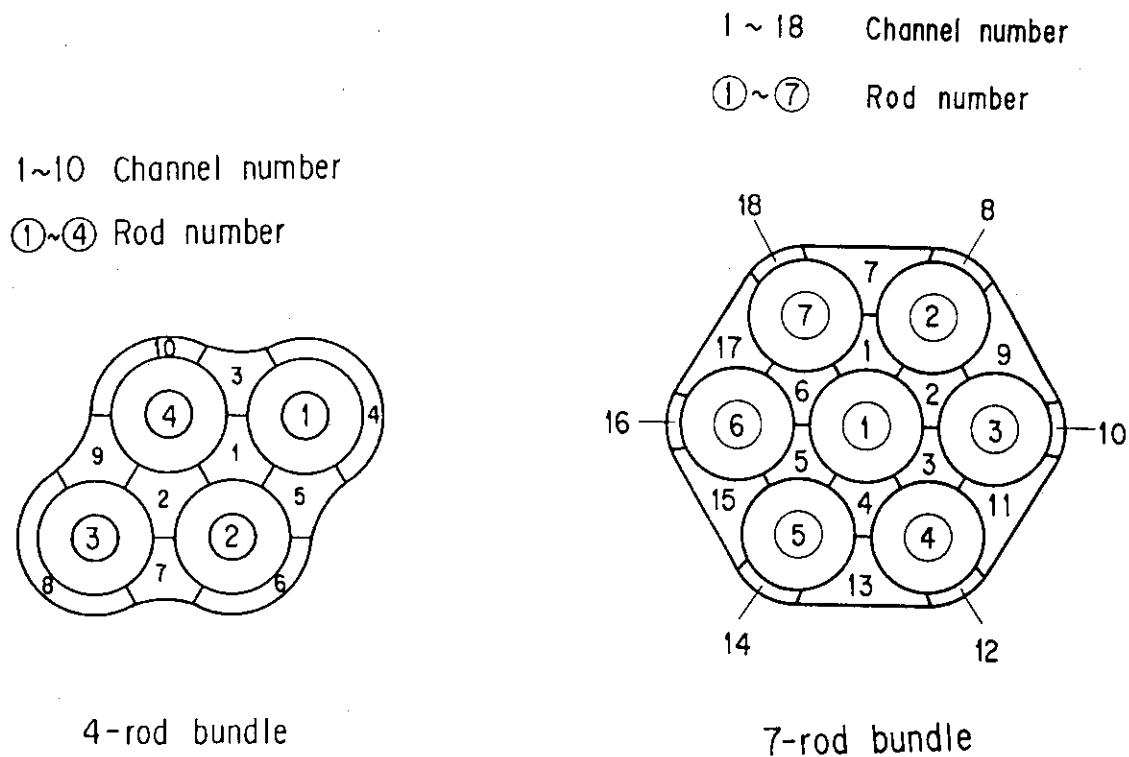


Fig. 3.13 COBRA-IV-I subchannel noding model

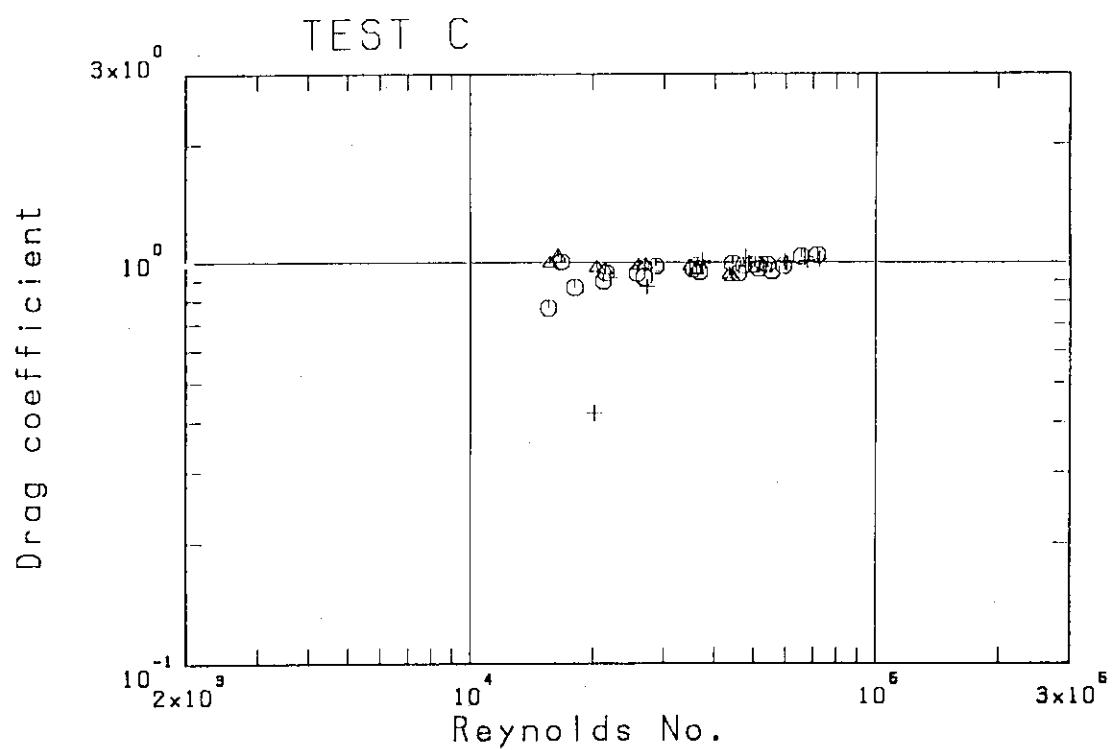
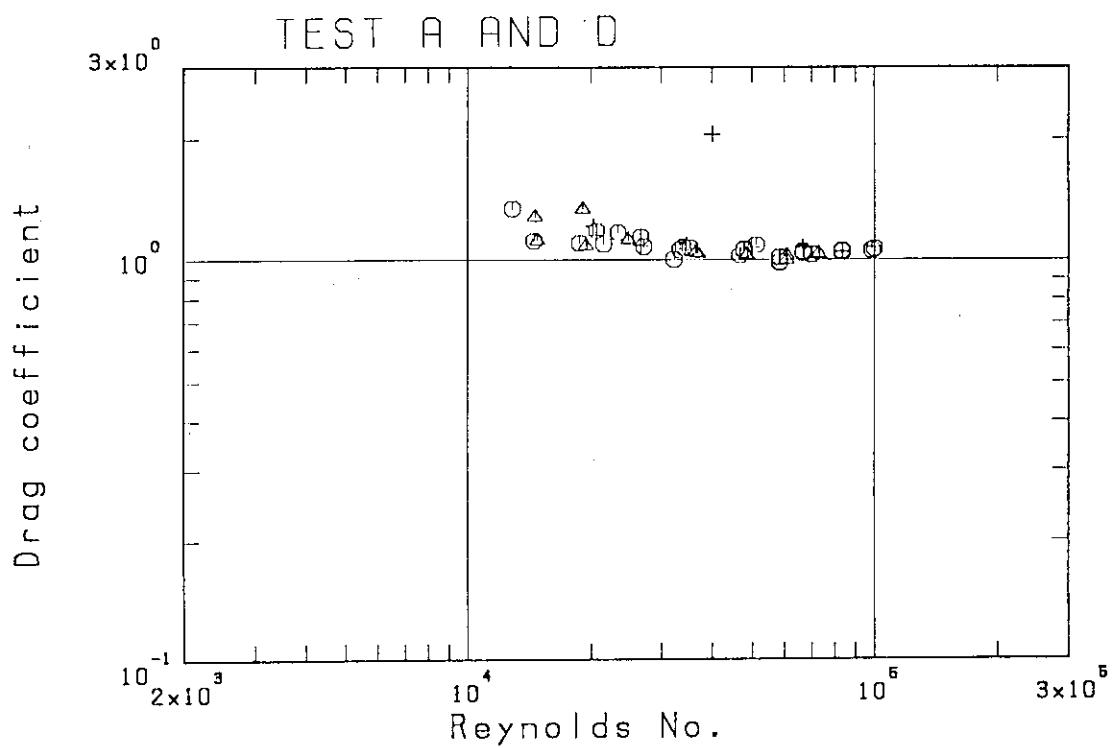


Fig. 3.14 Drag coefficient of grid spacer used in present experiments

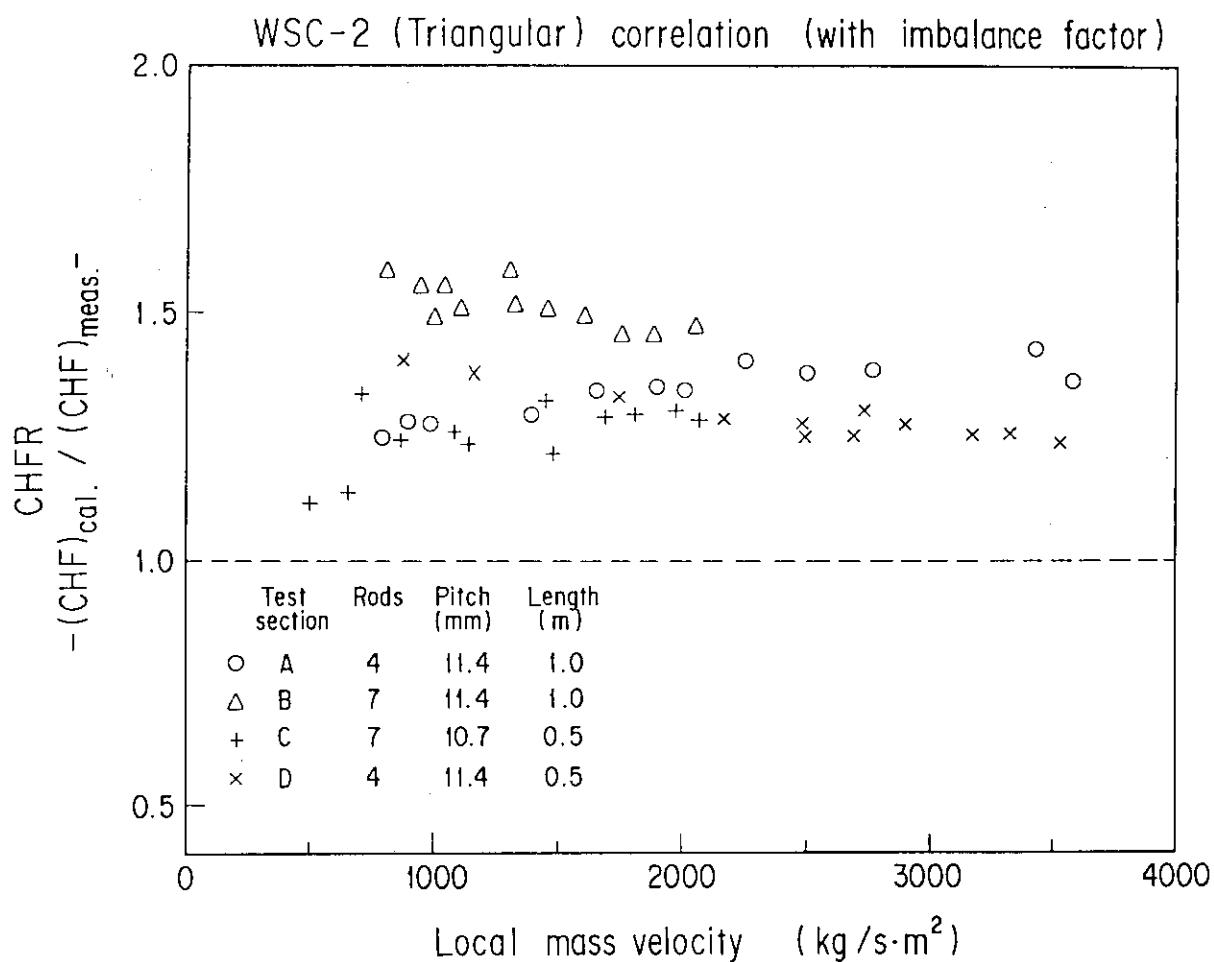


Fig. 3.15 Predicted to measured CHF ratio using subchannel analysis results (WSC-2-triangular correlation)

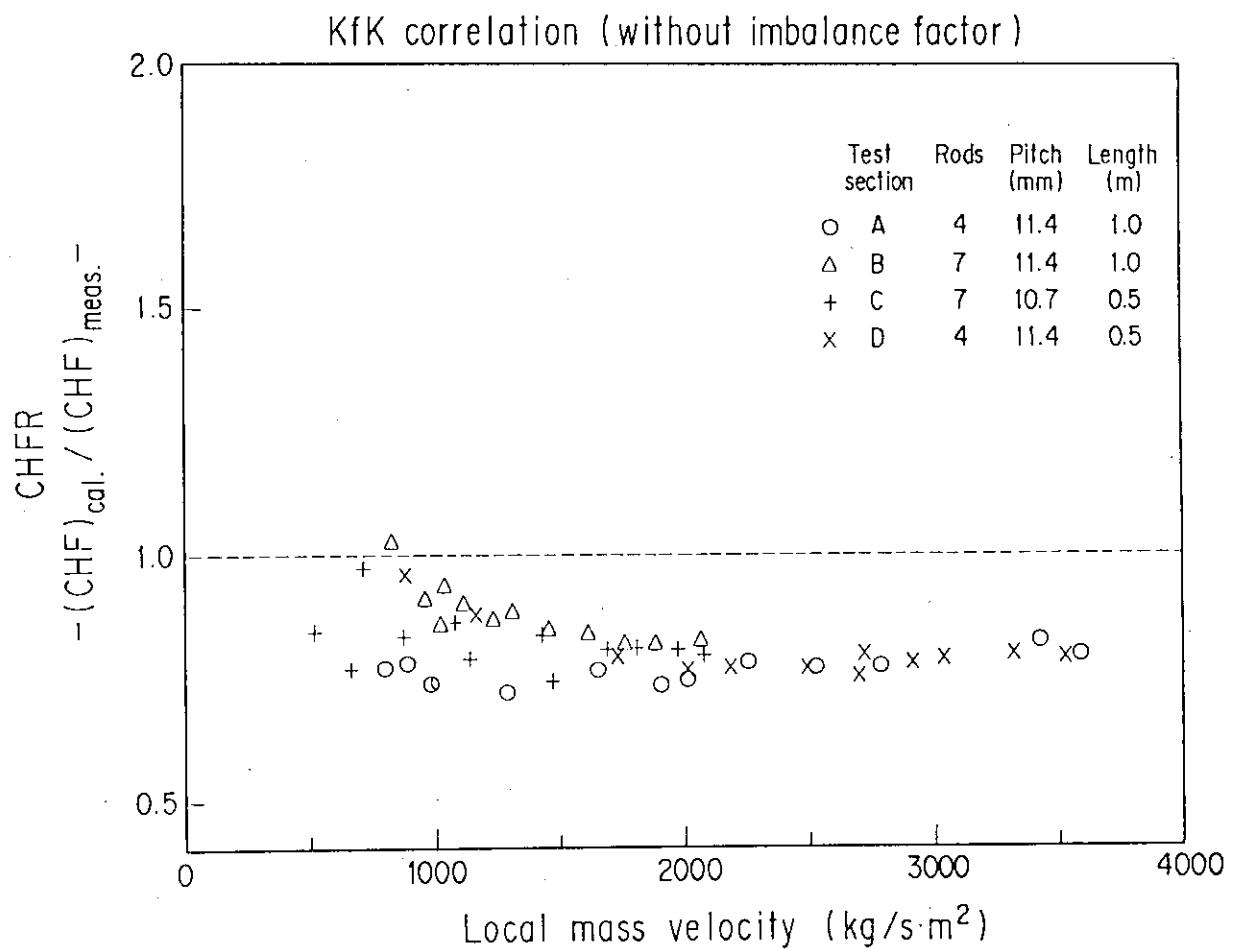


Fig. 3.16 Predicted to measured CHF ratio using subchannel analysis results
(KfK correlation without imbalance factor)

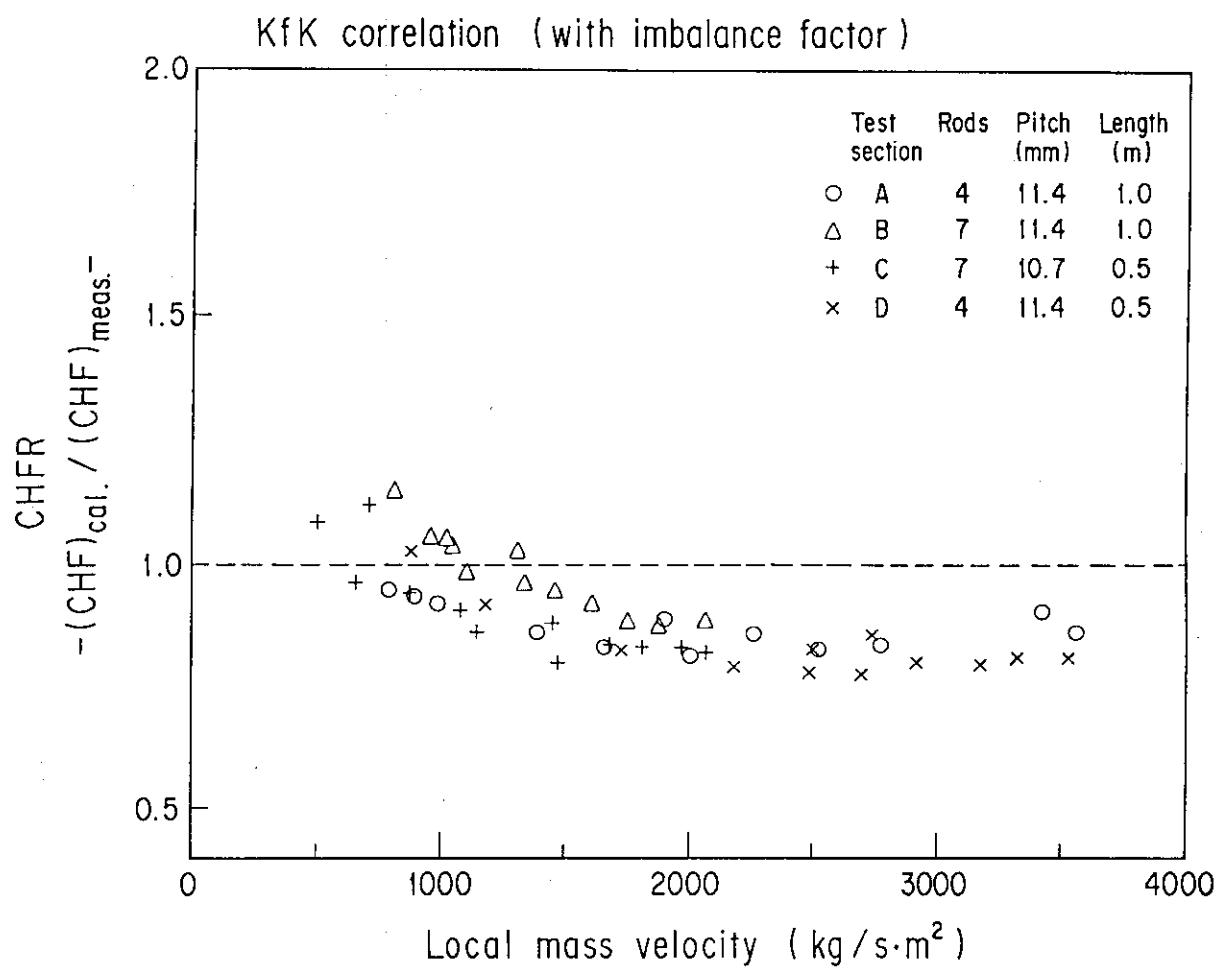


Fig. 3.17 Predicted to measured CHF ratio using subchannel analysis results
(KfK correlation with imbalance factor)

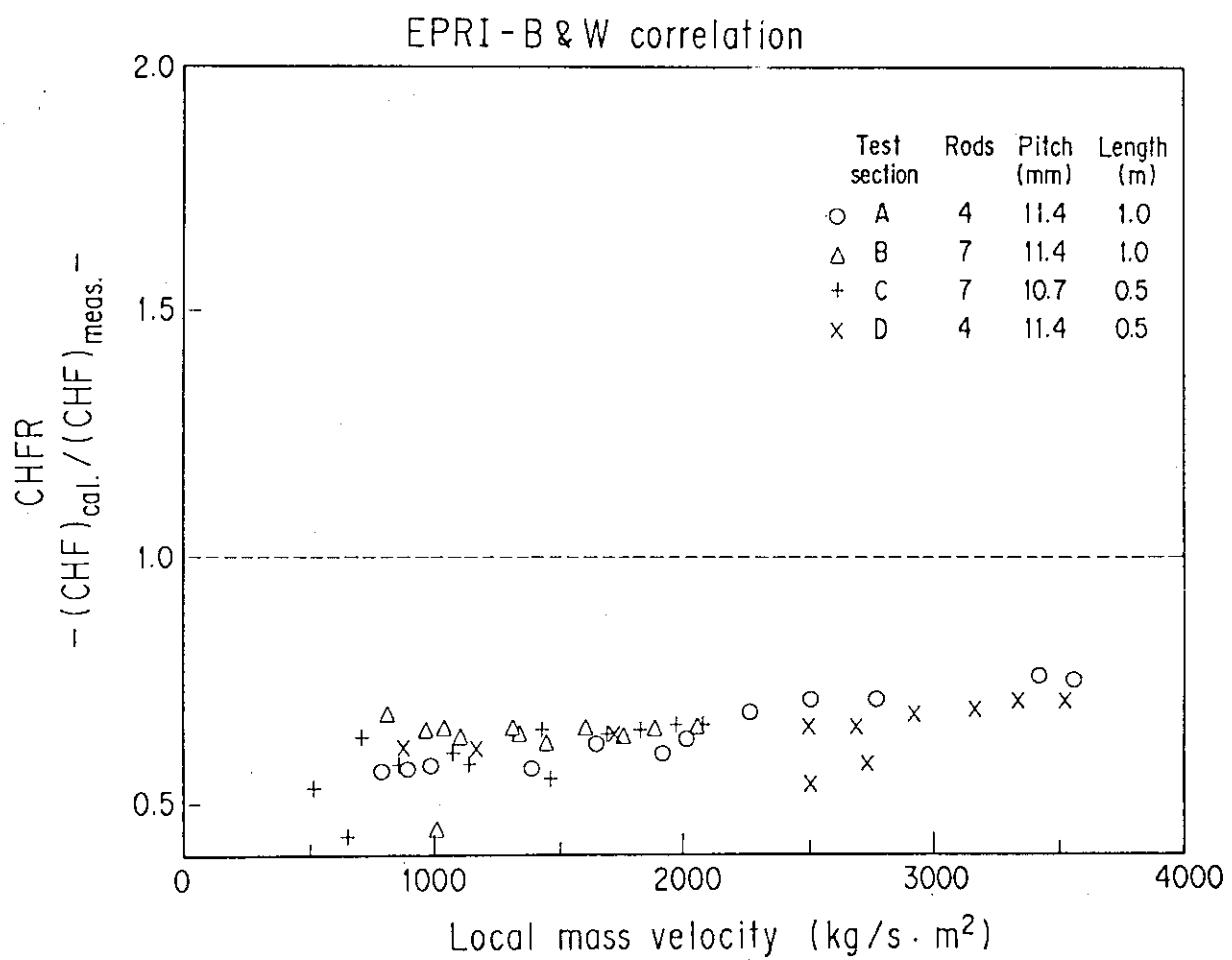


Fig. 3.18 Predicted to measured CHF ratio using subchannel analysis results (EPRI-B&W correlation)

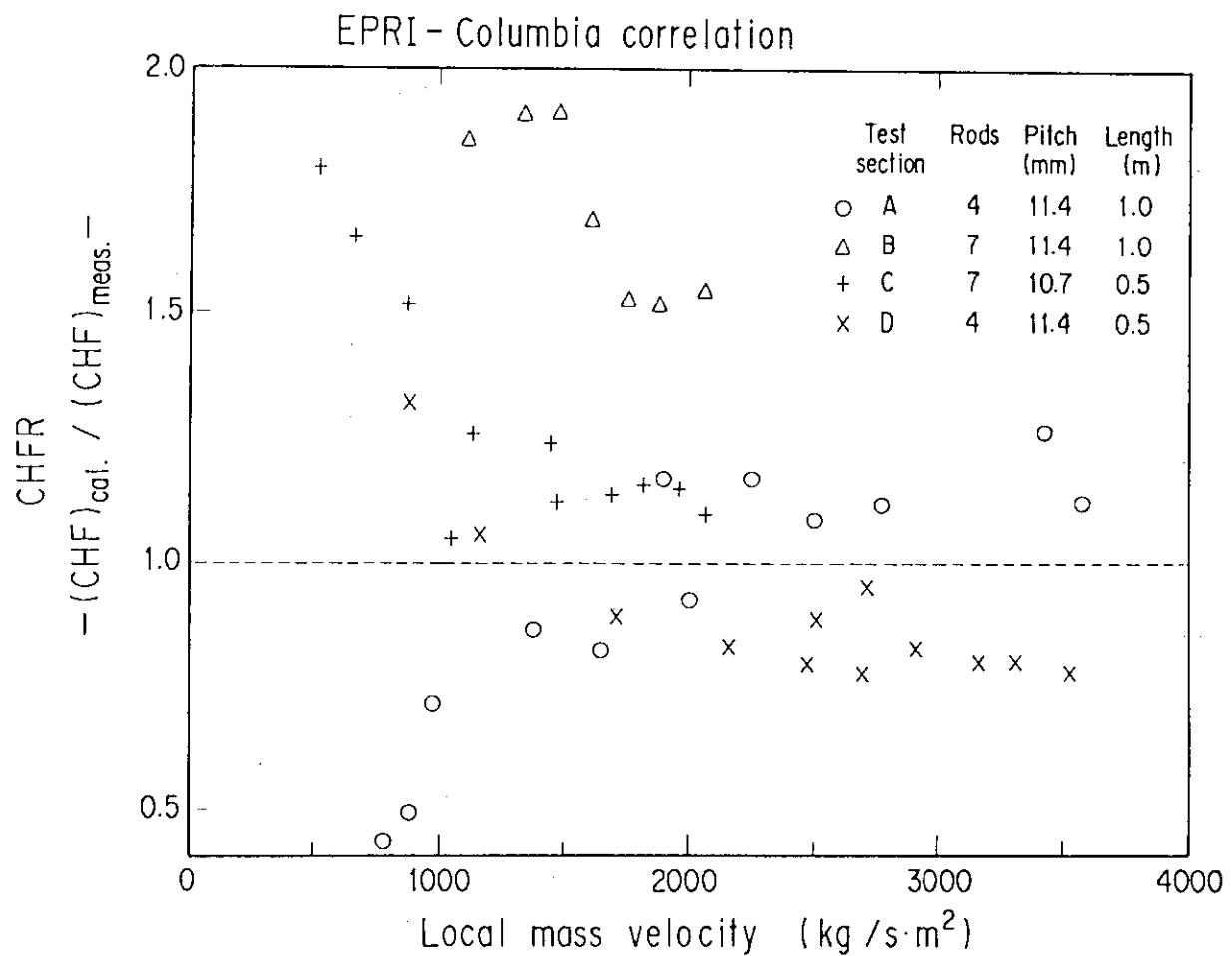


Fig. 3.19 Predicted to measured CHF ratio using subchannel analysis results (EPRI-Columbia correlation)

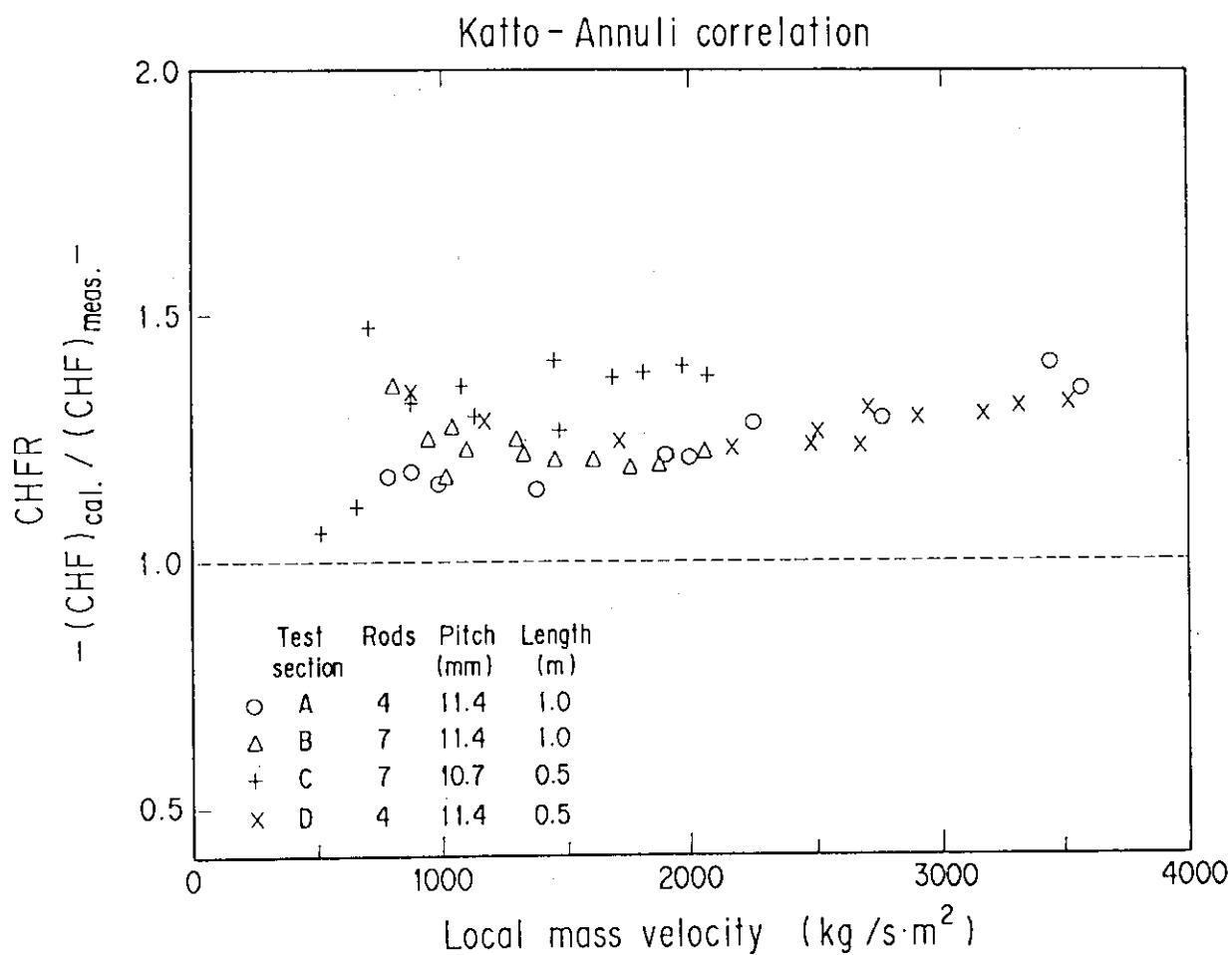


Fig. 3.20 Predicted to measured CHF ratio using subchannel analysis results (Katto-Annuli correlation)

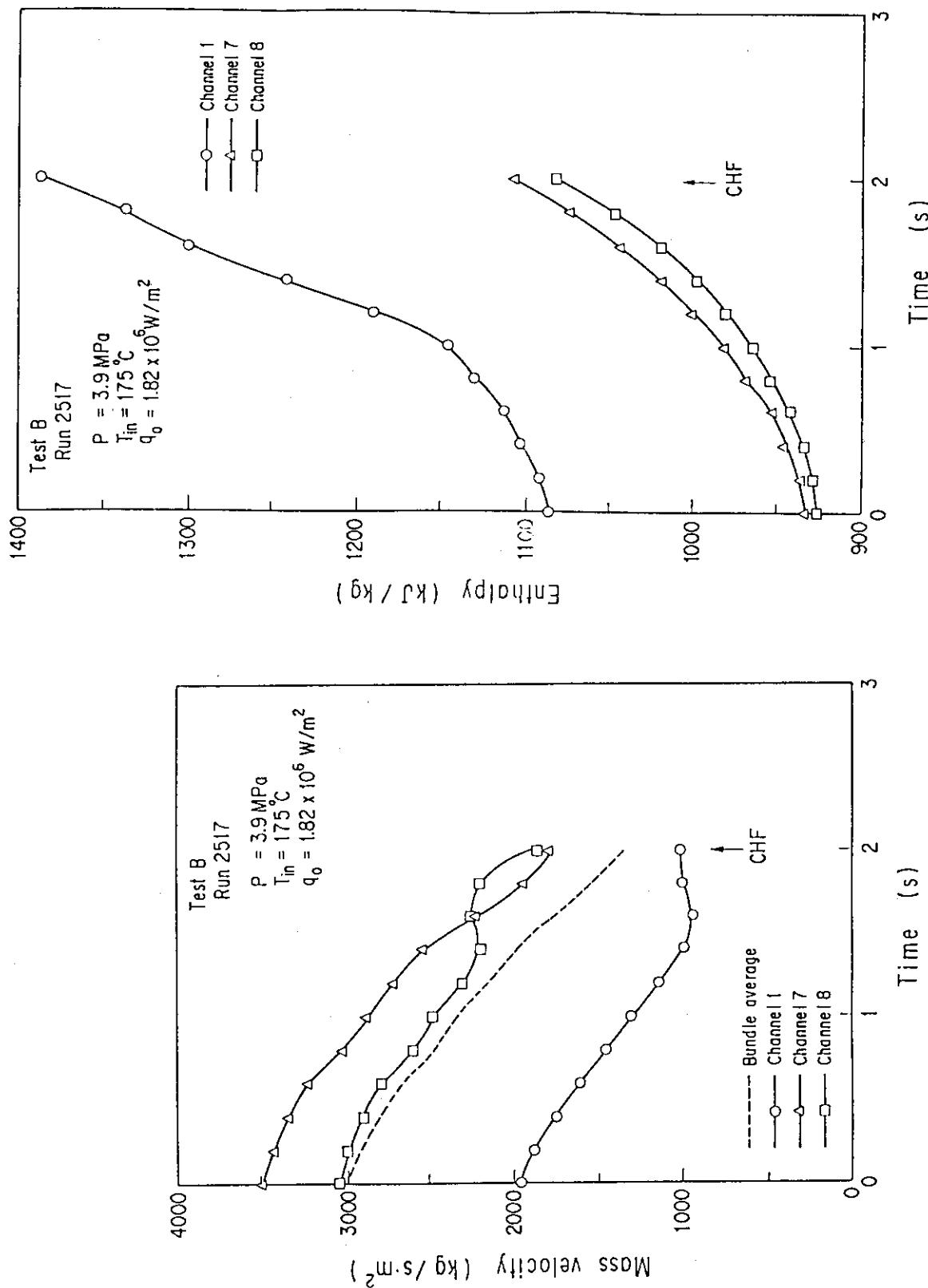


Fig. 3.21 Subchannel analysis results for flow reduction CHF experiment (fast transient test: $\Delta t_{B0} = 2 \text{ s}$)

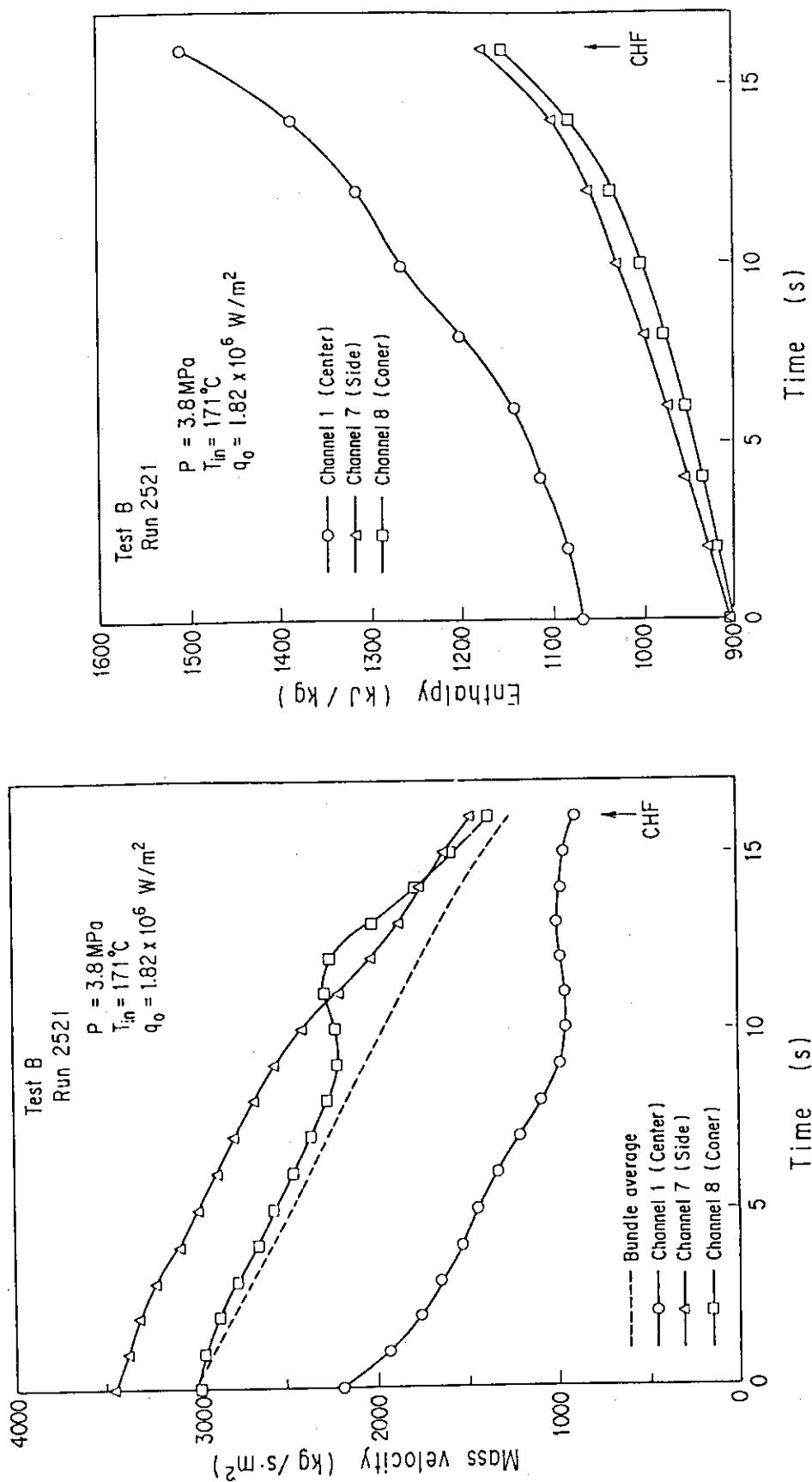


Fig. 3.22 Subchannel analysis results for flow reduction CHF experiment
(slow transient test: $\Delta t_{BO} = 16 \text{ s}$)

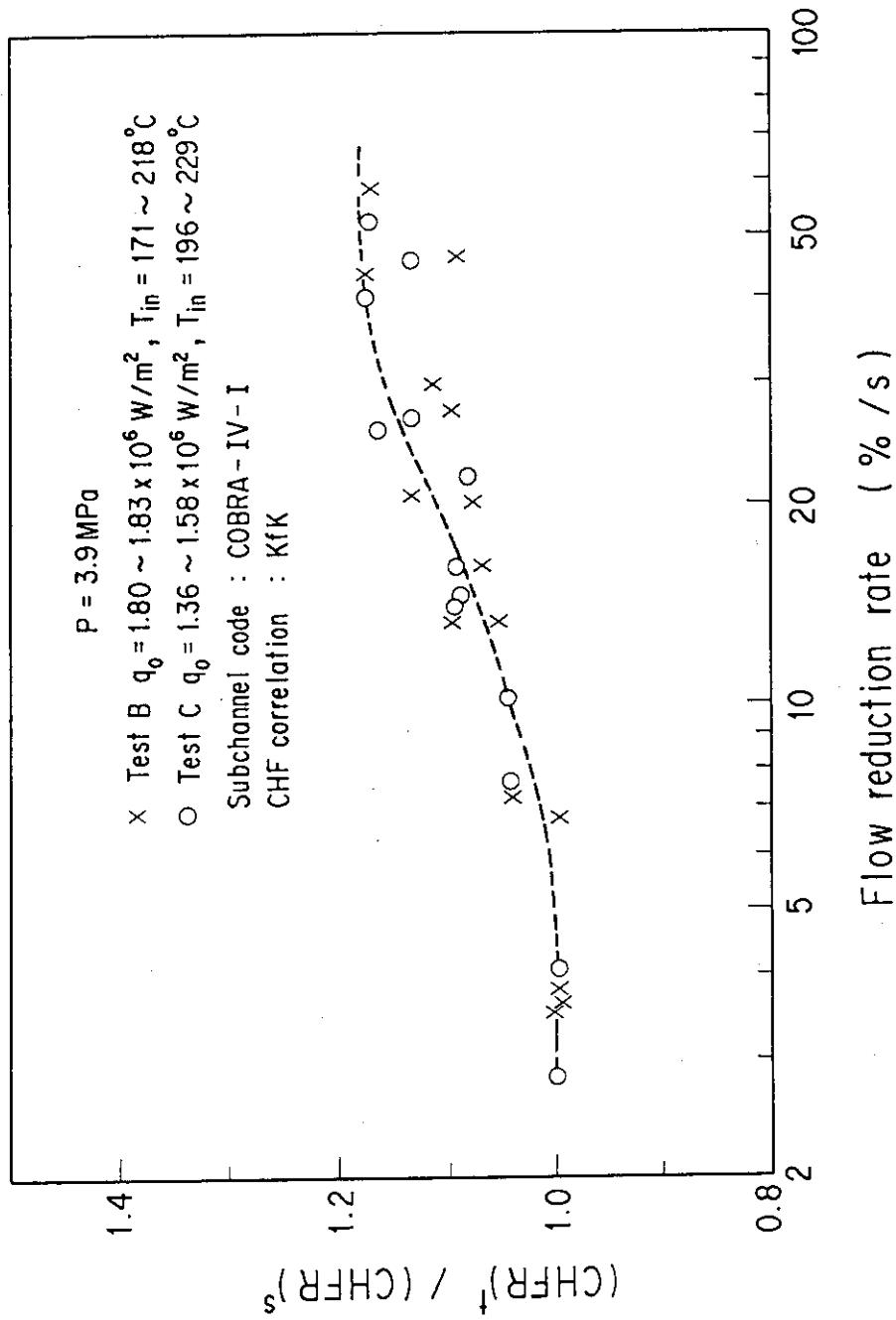


Fig. 3.23 CHF characteristics under flow reduction transients

4. 結 論

三角配列稠密格子バンドルでの定常及び流量低下非定常時の限界熱流束（CHF）実験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 定常実験結果についてバンドル平均質量速度及び出口クオリティについて比較すると、4本ロッドの方が、7本ロッドよりもCHFが大きくなつた。また、発熱長さが短いほどCHFは大きくなり、P/Dが小さいほどCHFは低下した。
- 2) サブチャンネル解析コードCOBRA-IV-Iにより局所流動条件を求め、CHF相関式の評価に用いた結果、インバランスファクターを用いたKfK相関式が20%以内の精度で定常CHFデータと一致した。一方、WSC-2、EPRI-B&W、EPRI-Columbia及びKattoの相関式については、データとの一致は良好ではなかった。
- 3) 流量低下時のCHFについては、流速減少率が6%/s以下では、過渡時と定常時のDNB発生条件に差は認められないが、流速減少率がさらに大きくなると、定常実験から予測されるDNB発生条件に達するよりも早くDNBに至る傾向が認められた。

謝 辞

本研究の遂行に際して、有益な助言と討論をいただいた、日本原子力研究所原子炉工学部金子義彦部長及び平岡徹次長に感謝いたします。

実験の実施に際しては、伝熱流動研究室新妻泰氏及び安全試験技術室鴨志田厚氏、渡辺博典氏及び小森慶一氏の協力が得られたことを感謝いたします。

また、COBRA-IV-Iコードのボイド率モデル改良については、九州大学工学部の岡本拓男氏の協力が得られたことを感謝いたします。

4. 結 論

三角配列稠密格子バンドルでの定常及び流量低下非定常時の限界熱流束（CHF）実験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 定常実験結果についてバンドル平均質量速度及び出口クオリティについて比較すると、4本ロッドの方が、7本ロッドよりもCHFが大きくなつた。また、発熱長さが短いほどCHFは大きくなり、P/Dが小さいほどCHFは低下した。
- 2) サブチャンネル解析コードCOBRA-IV-Iにより局所流動条件を求め、CHF相関式の評価に用いた結果、インバランスファクターを用いたKfK相関式が20%以内の精度で定常CHFデータと一致した。一方、WSC-2、EPRI-B&W、EPRI-Columbia及びKattoの相関式については、データとの一致は良好ではなかった。
- 3) 流量低下時のCHFについては、流速減少率が6%/s以下では、過渡時と定常時のDNB発生条件に差は認められないが、流速減少率がさらに大きくなると、定常実験から予測されるDNB発生条件に達するよりも早くDNBに至る傾向が認められた。

謝 辞

本研究の遂行に際して、有益な助言と討論をいただいた、日本原子力研究所原子炉工学部金子義彦部長及び平岡徹次長に感謝いたします。

実験の実施に際しては、伝熱流動研究室新妻泰氏及び安全試験技術室鴨志田厚氏、渡辺博典氏及び小森慶一氏の協力が得られたことを感謝いたします。

また、COBRA-IV-Iコードのボイド率モデル改良については、九州大学工学部の岡本拓男氏の協力が得られたことを感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 村尾良夫, 他, "原研における高転換軽水炉の熱水力工学的研究の概要" 日本原子力学会昭和63年秋の大会, F36, (1988).
- (2) Ishiguro, Y. et al.: "The Concept of High Conversion Light Water Reactor with Flat Core and Its Applications", ANS Reactor Physics Conference, October (1988)
- (3) Sugimoto, J. et al.: "Thermal-Hydraulic characteristics of Double Flat Core HCLWR", JAERI-M 89-002 (1989)
- (4) 森貴正, 他, :"高転換軽水炉の熱流力特性パラメータサーベイ", JAERI-M 88-224, (1988).
- (5) 岩村公道, 他, :"扁平二重炉心型高転換軽水炉の限界熱流束(CHF)特性", JAERI-M 89-004, (1989).
- (6) 岩村公道, 他, :"高転換軽水炉バーンアウト実験(1) (サブチャンネルに非加熱棒を挿入した4本ロッドバンドルにおける定常バーンアウト実験)", 未公開資料.
- (7) 岩村公道, 他, :"高転換軽水炉限界熱流束実験(2)-三角配列4本ロッドバンドル ($p/d = 1.2$)-", 未公開資料.
- (8) Dalle Donne, M. et al.: "Critical Heat Flux Correlation for Triangular Arrays of Rod Bundles with Tight Lattices, Including the Spiral Spacer Effect", Nuclear Technology 71, pp.111-124 (1985)
- (9) Uotinen, V.O. et al.: "Technical Feasibility of a Pressurized Water Reactor Design with a Low-Water-Volume-Fraction Lattice", EPRI-NP-1833, (1981)
- (10) Reedy, D.G. and Fighetti, C.F.: "Parametric Study of CHF Data, Volume 2. A Generalized Subchannel CHF Correlation for PWR and BWR Fuel Assemblies", EPRI-NP-2609, vol.2, (1983)
- (11) LeTourneau B.W. et al.: "Critical Heat Flux and Pressure Drop Tests with Parallel Upflow of High Pressure Water in Bundles of Twenty 0.25 and 0.28 -Inch Diameter Rods (LWBR Development Program)", WAPD-TM-1013, (1985)
- (12) 大久保努 他, :"稠密格子ロッドバンドルの流体混合係数", 日本原子力学会 1989年秋の大会 C33 (1989).
- (13) 岩村公道, 他, :"二相流条件下での流体混合特性に関する検討 (乱流混合係数のボイド率依存性がCHFの評価に及ぼす影響)", JAERI-M 89-127 (1989).

- (14) Wheeler, C.L. et al.: "COBRA-IV-1: An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores", BNWL-1962 (1976)
- (15) Bowring, R.W.: "WSC-2: A Subchannel Dryout Correlation for Water-Cooled Clusters over the Pressure Range 3.4-15.9 MPa (500-2300 Psia)", AEEW-R983 (1979)
- (16) Katto, Y.: "General Features of CHF of Forced Convection Boiling in Uniformly Heated Rectangular Channels", Int. J. Heat Mass Transfer vol.24, pp.1413-1419 (1981)
- (17) 佐田富道雄, :“垂直管群に平行な単相流および気液二相流に関する基礎的研究”, 九州大学学位論文.
- (18) Rowe, D.S. and Angle, C.W.: "Crossflow Mixing between Parallel Flow Channels during Boiling Part II, Measurement of Flow and Enthalpy in Two Parallel Channels", BNWL-371 Pt2, (1967)
- (19) Chexal, B. and Lellouche, G.: "A Full-Range Drift-Flux Correlations for Vertical Flows", EPRI NP-3989-sr (1985)
- (20) Zuber, N. and Findlay, J.A.: "Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems", Trans. ASME. Ser. C, 87, 453-468, (1965)
- (21) 大久保努 他, :“スパイラルワイスペーサおよびグリッドスペーサ付き稠密格子ロッドバンドルの流動抵抗特性”, 日本原子力学会昭和63年秋の大会 F38 (1988).
- (22) 奥村啓介 他, :“二重扁平炉心型高転換軽水炉の炉心燃焼計算”, 日本原子力学会 1989年秋の大会 C29 (1989).
- (23) 岩村公道 他, :“扁平二重炉心型高転換軽水炉の定常運転時及び事故時DNBR 解析”, JAERI-M 90-043 (1990).

付録A 定常CHF実験データ

記号の説明

RUN	= 実験番号
P R	= 圧 力 (MPa)
T S A T	= 鮑和温度 (K)
T I N	= 入口温度 (K)
T O U T	= 出口温度 (K)
W B	= 質量流量 (kg/s)
G B	= 質量速度 (kg/s·m ²)
V B	= 流 速 (m/s)
H S U B	= 入口サブクールエンタルピ (J/kg)
T S U B	= 入口サブクール温度 (K)
X B	= DNB時の出口クオリティ
Q B O	= 限界熱流束 (W/m ²)
D P	= 発熱部全長差圧 (kPa)

(A-1) Test section B

(a) P = 3.9 MPa, Tin = 210 °C

RUN	PR (MPa)	T _{SAT} (K)	T _{IN} (K)	G _B (KG/M ² .S)	V _B (M/S)	H _{SUB} (J/KG)	T _{SUB} (K)	X _B (-)	Q _{BO} (W/M ²)	D _P (KPA)
2001	3.54	516.5	474.5	630.	0.73	0.195E+06	42.0	0.182	0.89986E+06	15.3
2002	3.88	521.8	476.5	775.	0.90	0.212E+06	45.3	0.187	0.1146E+07	21.2
2003	3.88	521.9	483.8	987.	1.16	0.179E+06	38.0	0.188	0.1377E+07	30.3
2004	3.88	522.0	488.0	1257.	1.48	0.160E+06	34.0	0.183	0.1658E+07	43.9
2005	3.88	522.1	493.6	1459.	1.74	0.134E+06	28.4	0.177	0.1778E+07	54.8
2006	3.88	522.2	496.1	1752.	2.09	0.124E+06	26.1	0.159	0.1929E+07	72.0
2007	3.88	522.4	501.5	1948.	2.35	0.994E+05	20.9	0.167	0.2088E+07	85.5
2008	3.88	522.1	470.9	1610.	1.86	0.239E+06	51.2	0.140	0.2143E+07	59.7
2009	3.88	522.1	467.9	1601.	1.84	0.252E+06	54.1	0.123	0.2056E+07	54.8

(b) P = 3.9 MPa, Tin = 200 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
2100	3.93	522.6	467.4	652.	0.75	0.256E+06	55.1	0.144	0.9115E+06	16.2
2101	3.93	522.5	465.5	796.	0.91	0.265E+06	57.1	0.142	0.1124E+07	21.5
2102	3.93	522.6	463.0	1030.	1.18	0.276E+06	59.6	0.127	0.1416E+07	31.8
2103	3.93	522.7	470.4	1213.	1.40	0.244E+06	52.3	0.135	0.1600E+07	39.5
2104	3.93	522.8	474.8	1537.	1.78	0.224E+06	48.0	0.123	0.1860E+07	56.1
2105	3.93	522.9	476.0	1789.	2.08	0.219E+06	46.9	0.116	0.2078E+07	68.9
2106	3.93	523.0	474.8	1966.	2.28	0.225E+06	48.2	0.105	0.2212E+07	77.9
2107	3.93	523.0	472.8	1980.	2.29	0.234E+06	50.1	0.100	0.2233E+07	77.9
2108	3.78	520.3	463.8	645.	0.74	0.262E+06	56.5	0.131	0.8749E+06	15.9
2109	3.93	522.5	467.9	805.	0.92	0.254E+06	54.6	0.150	0.1145E+07	22.5
2110	3.93	522.6	472.8	997.	1.15	0.232E+06	49.8	0.148	0.1347E+07	30.9
2111	3.92	522.6	472.3	1277.	1.48	0.235E+06	50.3	0.134	0.1648E+07	42.6
2112	3.93	522.8	473.6	1521.	1.76	0.230E+06	49.2	0.125	0.1876E+07	54.8
2113	3.93	522.9	474.0	1701.	1.97	0.228E+06	48.9	0.118	0.2032E+07	64.2
2114	3.93	522.9	472.3	1876.	2.17	0.236E+06	50.6	0.100	0.2125E+07	73.3
2115	3.93	522.9	480.2	1881.	2.20	0.201E+06	42.8	0.123	0.2148E+07	75.1
2116	3.93	522.6	470.4	799.	0.92	0.243E+06	52.2	0.141	0.1077E+07	22.8

(c) P = 3.9 MPa, Tin = 140 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBD (W/M2)	DP (KPA)
2201	3.93	522.5	408.4	804.	0.87	0.514E+06	114.1	0.043	0.1312E+07	19.7
2202	3.92	522.5	431.6	814.	0.90	0.414E+06	90.9	0.103	0.1336E+07	21.9
2203	3.93	522.6	426.0	1053.	1.15	0.439E+06	96.6	0.072	0.1645E+07	29.8
2204	3.93	522.7	430.4	1368.	1.50	0.420E+06	92.3	0.062	0.2000E+07	40.9
2205	3.93	522.7	432.1	1510.	1.66	0.413E+06	90.6	0.063	0.2187E+07	46.9
2206	3.93	522.7	435.3	1459.	1.61	0.399E+06	87.5	0.077	0.2149E+07	47.1
2207	3.93	522.7	426.7	1302.	1.43	0.436E+06	95.9	0.064	0.1970E+07	38.7
2208	3.93	522.7	428.0	1275.	1.40	0.431E+06	94.7	0.071	0.1958E+07	38.6
2209	3.93	522.6	423.6	1197.	1.31	0.449E+06	99.1	0.063	0.1851E+07	35.6
2210	3.93	522.6	426.7	881.	0.96	0.435E+06	95.8	0.098	0.1477E+07	24.6
2211	3.93	522.6	426.7	872.	0.95	0.435E+06	95.8	0.082	0.1395E+07	23.3
2212	3.93	522.8	433.3	1584.	1.75	0.408E+06	89.4	0.052	0.2186E+07	51.1
2213	3.93	522.5	395.5	753.	0.80	0.569E+06	127.0	0.015	0.1245E+07	17.5
2214	3.93	522.7	407.7	1367.	1.47	0.518E+06	115.0	0.038	0.22214E+07	41.1
2215	3.93	522.7	410.2	1276.	1.37	0.507E+06	112.5	0.052	0.2111E+07	36.9
2216	3.93	522.7	399.2	1094.	1.17	0.554E+06	123.5	0.048	0.1931E+07	30.7
2217	3.93	522.6	395.0	1069.	1.14	0.571E+06	127.6	0.037	0.1886E+07	30.1
2218	3.93	522.6	398.0	993.	1.06	0.559E+06	124.6	0.060	0.1827E+07	27.9
2219	3.93	522.6	399.2	945.	1.01	0.554E+06	123.4	0.053	0.1690E+07	24.7
2220	3.93	522.5	396.7	790.	0.84	0.564E+06	125.8	0.032	0.1357E+07	19.9

(d) P = 3.9 MPa, Tin = 210 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
2301	3.93	522.5	456.4	649.	0.73	0.305E+06	66.1	0.130	0.9534E+06	16.8
2302	3.92	522.5	464.2	807.	0.92	0.270E+06	58.2	0.143	0.1158E+07	23.2
2303	3.93	522.6	465.5	1012.	1.16	0.265E+06	57.1	0.131	0.1378E+07	31.6
2304	3.93	522.7	479.7	1306.	1.52	0.202E+06	43.0	0.150	0.1666E+07	47.0
2305	3.93	522.8	474.8	1553.	1.80	0.224E+06	48.0	0.121	0.1860E+07	59.9
2306	3.93	522.9	487.0	1738.	2.05	0.169E+06	35.9	0.140	0.1973E+07	74.4
2307	3.93	523.0	487.5	1930.	2.28	0.167E+06	35.5	0.125	0.2044E+07	82.4
2308	3.93	523.1	483.8	2065.	2.42	0.184E+06	39.2	0.113	0.2169E+07	91.1
2309	3.93	523.1	487.5	2066.	2.44	0.168E+06	35.6	0.123	0.2174E+07	93.7
2310	3.93	523.1	490.0	2140.	2.53	0.157E+06	33.2	0.120	0.2158E+07	100.7
2311	3.93	523.2	493.6	2236.	2.66	0.140E+06	29.5	0.122	0.2166E+07	110.1
2312	3.93	523.2	493.6	2315.	2.76	0.140E+06	29.6	0.121	0.2232E+07	111.9
2313	3.93	523.2	492.4	2315.	2.75	0.146E+06	30.8	0.116	0.2215E+07	112.8
2314	3.93	523.3	498.1	2435.	2.92	0.120E+06	25.2	0.124	0.2252E+07	121.7
2315	3.93	523.3	496.8	2442.	2.92	0.126E+06	26.5	0.121	0.2254E+07	122.0
2316	3.93	523.4	495.6	2669.	3.19	0.132E+06	27.8	0.105	0.2308E+07	140.7
2317	3.93	523.0	479.7	1985.	2.32	0.203E+06	43.3	0.112	0.2178E+07	87.0
2318	3.93	523.0	486.3	1798.	2.12	0.173E+06	36.7	0.132	0.1990E+07	78.4
2319	3.93	523.0	494.4	1721.	2.05	0.136E+06	28.6	0.158	0.1946E+07	81.5
2320	3.93	522.9	493.6	1644.	1.96	0.139E+06	29.3	0.156	0.1857E+07	76.4
2321	3.93	522.9	494.9	1556.	1.86	0.133E+06	28.0	0.167	0.1812E+07	72.4
2322	3.93	522.9	498.5	1479.	1.77	0.116E+06	24.3	0.178	0.1725E+07	64.7
2323	3.93	522.8	494.9	1395.	1.66	0.133E+06	27.9	0.170	0.1643E+07	59.4

(d) continue

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
2324	3.93	522.8	498.5	1310.	1.57	0.115E+06	24.2	0.185	0.1576E+07	54.4
2325	3.93	522.7	494.9	1231.	1.47	0.132E+06	27.9	0.181	0.1513E+07	49.3
2326	3.93	522.7	495.6	1101.	1.31	0.128E+06	27.1	0.191	0.1394E+07	41.7
2327	3.93	522.6	491.2	992.	1.18	0.149E+06	31.4	0.183	0.1275E+07	35.7
2328	3.93	522.6	491.2	906.	1.07	0.149E+06	31.4	0.188	0.1187E+07	31.4
2329	3.93	522.6	490.7	823.	0.98	0.151E+06	31.9	0.193	0.1099E+07	27.4
2330	3.93	522.6	479.7	761.	0.89	0.201E+06	42.9	0.162	0.1011E+07	23.4
2331	3.93	522.5	482.1	672.	0.79	0.190E+06	40.4	0.165	0.8833E+06	19.0

(e) P = 1.0 MPa, Tin = 130 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	V _B (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	X _B (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
2601	1.08	457.1	408.6	696.	0.75	0.211E+06	48.5	0.140	0.9493E+06	29.9
2602	1.08	457.3	407.9	826.	0.89	0.215E+06	49.4	0.141	0.1141E+07	42.5
2603	1.08	457.5	407.9	1531.	1.65	0.216E+06	49.6	0.043	0.1279E+07	51.3
2604	1.08	457.6	409.1	992.	1.07	0.211E+06	48.5	0.139	0.1346E+07	56.0
2605	1.08	457.7	406.7	1114.	1.20	0.222E+06	51.1	0.124	0.1455E+07	62.4
2606	1.08	457.9	403.0	1232.	1.32	0.239E+06	54.9	0.110	0.1567E+07	70.8
2607	1.08	458.1	400.5	1322.	1.41	0.250E+06	57.5	0.098	0.1632E+07	77.8
2608	1.08	458.3	401.3	1411.	1.51	0.247E+06	57.0	0.096	0.1716E+07	87.8
2609	1.08	458.4	404.2	1493.	1.60	0.235E+06	54.1	0.096	0.1770E+07	93.9
2610	1.08	458.5	405.4	1539.	1.65	0.231E+06	53.0	0.098	0.1818E+07	98.9
2611	1.08	458.6	406.2	1628.	1.75	0.228E+06	52.5	0.094	0.1878E+07	107.8
2612	1.08	458.9	410.3	1709.	1.84	0.211E+06	48.5	0.098	0.1930E+07	120.1
2613	1.08	459.0	407.4	1791.	1.92	0.225E+06	51.6	0.089	0.2003E+07	126.8
2614	1.08	459.2	406.7	1858.	1.99	0.228E+06	52.5	0.087	0.2072E+07	134.7
2615	1.08	459.4	409.1	1896.	2.04	0.219E+06	50.2	0.088	0.2075E+07	145.0
2616	1.08	459.5	405.4	1980.	2.12	0.235E+06	54.1	0.075	0.2114E+07	153.2
2617	1.08	459.6	407.4	2028.	2.18	0.227E+06	52.1	0.077	0.2136E+07	154.3
2618	1.08	459.6	401.3	2112.	2.26	0.253E+06	58.3	0.061	0.2199E+07	158.3
2619	1.08	459.8	408.6	2160.	2.32	0.223E+06	51.2	0.073	0.2207E+07	169.6

(a) P = 3.9 MPa, Tin = 230 °C

RUN	PR (MPa)	T _{SAT} (K)	T _{IN} (K)	G _B (KG/M ² .S)	V _B (M/S)	H _{SUB} (J/KG)	T _{SUB} (K)	X _B (-)	Q _{BO} (W/M ²)	D _P (kPa)
3105	3.93	522.4	494.6	617.	0.74	0.132E+06	27.8	0.239	0.1182E+07	6.1
3106	3.93	522.4	496.6	724.	0.87	0.123E+06	25.9	0.233	0.1337E+07	9.6
3107	3.93	522.5	495.4	863.	1.03	0.129E+06	27.1	0.212	0.1506E+07	13.1
3108	3.93	522.5	497.8	997.	1.19	0.117E+06	24.7	0.199	0.1616E+07	17.6
3109	3.93	522.5	502.7	1112.	1.34	0.946E+05	19.8	0.197	0.1705E+07	21.7
3110	3.93	522.6	502.0	1259.	1.52	0.983E+05	20.6	0.187	0.1869E+07	28.0
3111	3.93	522.6	503.2	1376.	1.66	0.927E+05	19.4	0.180	0.1957E+07	31.7
3112	3.93	522.6	506.9	1375.	1.67	0.754E+05	15.7	0.185	0.1909E+07	32.8
3113	3.93	522.7	510.1	1571.	1.92	0.606E+05	12.6	0.178	0.2035E+07	40.4
3114	3.93	522.6	509.3	1282.	1.57	0.637E+05	13.3	0.197	0.1822E+07	29.0
3115	3.93	522.5	508.1	1126.	1.37	0.692E+05	14.4	0.203	0.1667E+07	22.7
3116	3.93	522.5	507.6	990.	1.21	0.714E+05	14.9	0.216	0.1551E+07	18.1
3117	3.93	522.5	506.4	845.	1.03	0.770E+05	16.1	0.229	0.1404E+07	12.8
3118	3.93	522.4	504.4	719.	0.87	0.861E+05	18.0	0.238	0.1258E+07	8.7
3119	3.93	522.4	502.0	584.	0.70	0.974E+05	20.4	0.251	0.1094E+07	5.3
3310	3.93	522.5	497.1	757.	0.91	0.120E+06	25.4	0.230	0.1379E+07	9.8
3311	3.93	522.5	494.6	1136.	1.36	0.132E+06	27.9	0.179	0.1769E+07	20.3
3312	3.93	522.6	504.4	1453.	1.76	0.869E+05	18.2	0.176	0.2002E+07	32.1
3313	3.93	522.7	508.1	1602.	1.95	0.698E+05	14.6	0.173	0.2080E+07	38.1
3314	3.93	522.7	510.1	1728.	2.11	0.607E+05	12.6	0.170	0.2150E+07	44.4
3315	3.93	522.8	511.3	1910.	2.34	0.551E+05	11.5	0.160	0.2231E+07	50.5
3316	3.93	522.8	511.8	2034.	2.49	0.530E+05	11.0	0.154	0.2283E+07	55.6

(a) continue

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	G _B (KG/M ² .S)	V _B (M/S)	H _{SUB} (J/KG)	T _{SUB} (K)	X _B (-)	QBO (W/M ²)	DP (KPA)
3317	3.93	522.8	511.3	2151.	2.64	0.555E+05	11.5	0.148	0.2353E+07	60.1
3318	3.93	522.9	510.6	2280.	2.79	0.592E+05	12.3	0.141	0.2429E+07	65.2
3411	3.93	522.8	500.8	2095.	2.52	0.105E+06	22.0	0.128	0.2407E+07	53.2
3412	3.93	522.8	505.2	2131.	2.58	0.843E+05	17.6	0.130	0.2311E+07	55.0
3413	3.93	522.8	507.6	2261.	2.75	0.729E+05	15.2	0.131	0.2378E+07	59.8
3414-	3.93	522.9	508.8	2349.	2.87	0.673E+05	14.0	0.131	0.2423E+07	65.1
3415	3.93	522.9	503.2	2498.	3.02	0.939E+05	19.7	0.114	0.2552E+07	67.1
3416	3.93	522.9	500.3	2591.	3.12	0.108E+06	22.6	0.108	0.2686E+07	71.3
3417	3.93	522.9	504.4	2650.	3.21	0.884E+05	18.5	0.109	0.2585E+07	74.0
3418	3.93	523.0	506.4	2757.	3.35	0.793E+05	16.6	0.109	0.2597E+07	77.7
3419	3.93	523.0	504.4	2869.	3.47	0.887E+05	18.6	0.101	0.2655E+07	80.9
3420	3.93	523.0	504.4	2916.	3.53	0.887E+05	18.6	0.099	0.2669E+07	82.5
3421	3.93	523.0	504.4	3011.	3.65	0.889E+05	18.6	0.098	0.2735E+07	87.7
3422	3.93	523.1	505.2	3087.	3.74	0.857E+05	17.9	0.099	0.2796E+07	92.6
3423	3.93	522.4	502.0	610.	0.74	0.975E+05	20.4	0.257	0.1163E+07	6.1
3424	3.93	522.4	502.7	579.	0.70	0.940E+05	19.7	0.256	0.1093E+07	5.0
3425	3.93	522.4	502.7	546.	0.66	0.940E+05	19.7	0.260	0.1044E+07	4.3
3426	3.93	522.4	503.2	498.	0.60	0.916E+05	19.2	0.250	0.9186E+06	2.3
3428	3.93	522.4	490.5	462.	0.55	0.151E+06	31.9	0.177	0.7425E+06	-0.2

(b) P = 3.9 MPa, Tin = 200 °C

RUN	PR (MPa)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
3101	3.93	522.4	460.3	656.	0.75	0.287E+06	62.1	0.194	0.1439E+07	6.8
3102	3.93	522.4	466.5	724.	0.83	0.260E+06	56.0	0.198	0.1536E+07	8.6
3103	3.93	522.5	475.0	896.	1.04	0.222E+06	47.4	0.184	0.1706E+07	12.7
3104	3.93	522.5	468.9	1023.	1.18	0.249E+06	53.6	0.161	0.1905E+07	17.1
3320	3.93	522.4	467.7	628.	0.72	0.254E+06	54.7	0.209	0.1364E+07	5.6
3402	3.93	522.4	466.0	753.	0.86	0.262E+06	56.5	0.191	0.1572E+07	8.9
3403	3.93	522.5	471.4	862.	0.99	0.238E+06	51.1	0.173	0.1632E+07	10.4
3404	3.93	522.5	469.6	1162.	1.34	0.246E+06	52.9	0.127	0.1909E+07	15.7
3405	3.93	522.5	471.4	1160.	1.34	0.238E+06	51.2	0.151	0.2045E+07	19.3
3406	3.93	522.5	470.9	1286.	1.48	0.241E+06	51.7	0.137	0.2169E+07	22.5
3407	3.93	522.6	467.7	1448.	1.66	0.255E+06	54.9	0.120	0.2365E+07	26.6
3408	3.93	522.6	473.3	1544.	1.79	0.230E+06	49.3	0.126	0.2433E+07	30.6
3409	3.93	522.7	470.9	1716.	1.98	0.241E+06	51.8	0.115	0.2665E+07	36.6
3410	3.93	522.7	478.7	1834.	2.14	0.206E+06	44.0	0.114	0.2606E+07	39.0
3523	3.93	522.7	476.3	1945.	2.26	0.217E+06	46.4	0.103	0.2712E+07	41.7
3524	3.93	522.7	477.5	2039.	2.37	0.212E+06	45.2	0.099	0.2747E+07	44.0
3525	3.93	522.7	478.7	2157.	2.51	0.206E+06	44.0	0.093	0.2791E+07	47.9
3526	3.93	522.8	482.4	2333.	2.73	0.190E+06	40.4	0.093	0.2878E+07	55.0

(c) P = 3.9 MPa, Tin = 145 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
3527	3.93	522.4	417.0	638.	0.69	0.477E+06	105.4	0.205	0.1871E+07	4.0
3528	3.93	522.4	418.7	907.	0.99	0.469E+06	103.8	0.117	0.2152E+07	9.3
3529	3.93	522.5	420.6	1212.	1.32	0.461E+06	101.9	0.082	0.2578E+07	15.3

(d) P = 1.0 MPa, Tin = 160 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
3501	1.08	456.8	430.9	654.	0.72	0.113E+06	25.9	0.203	0.1201E+07	15.2
3502	1.08	457.1	434.1	900.	0.99	0.101E+06	23.0	0.184	0.1495E+07	28.5
3503	1.08	457.4	430.9	1127.	1.24	0.116E+06	26.4	0.163	0.1762E+07	43.6
3504	1.08	457.7	435.3	1363.	1.51	0.980E+05	22.3	0.153	0.1942E+07	57.7
3505	1.08	458.1	431.7	1641.	1.81	0.116E+06	26.4	0.135	0.2241E+07	79.0
3506	1.08	458.4	434.6	1860.	2.05	0.104E+06	23.7	0.129	0.2375E+07	92.9
3507	1.08	458.5	434.1	1973.	2.18	0.107E+06	24.4	0.124	0.2476E+07	102.8
3508	1.08	458.6	433.4	2040.	2.25	0.111E+06	25.3	0.121	0.2534E+07	108.0
3509	1.08	458.9	433.4	2197.	2.42	0.112E+06	25.5	0.115	0.2643E+07	118.6
3510	1.08	459.0	431.7	2228.	2.45	0.120E+06	27.3	0.114	0.2741E+07	126.3
3511	1.08	459.1	434.1	2333.	2.57	0.110E+06	25.0	0.113	0.2763E+07	131.5
3512	1.08	459.2	429.7	2425.	2.66	0.129E+06	29.5	0.103	0.2860E+07	137.0
3513	1.08	459.5	433.4	2537.	2.80	0.115E+06	26.1	0.104	0.2888E+07	149.3
3514	1.08	459.5	434.6	2572.	2.84	0.109E+06	24.9	0.105	0.2899E+07	151.6

(e) P = 1.0 MPa, Tin = 135 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
3515	1.08	456.9	403.5	698.	0.75	0.232E+06	53.4	0.178	0.1452E+07	18.0
3516	1.08	457.0	399.8	872.	0.93	0.248E+06	57.2	0.149	0.1681E+07	23.7
3517	1.08	457.3	416.2	1120.	1.21	0.179E+06	41.0	0.141	0.1825E+07	38.3
3518	1.08	457.6	409.6	1432.	1.54	0.209E+06	48.0	0.120	0.2275E+07	56.0
3519	1.08	457.9	405.9	1659.	1.78	0.226E+06	51.9	0.102	0.2521E+07	68.7
3520	1.08	458.2	407.7	1907.	2.05	0.220E+06	50.5	0.096	0.2771E+07	83.6
3521	1.08	458.2	407.2	1990.	2.14	0.222E+06	51.1	0.091	0.2836E+07	86.3
3522	1.08	458.4	410.1	2096.	2.26	0.210E+06	48.3	0.091	0.2904E+07	97.1

(A-3) Test section D

(a) P = 3.9 MPa, Tin = 200 °C

RUN	PR (MPa)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
4101	3.93	522.4	455.7	769.	0.87	0.308E+06	66.7	0.173	0.2178E+07	5.6
4102	3.93	522.4	456.9	862.	0.98	0.303E+06	65.5	0.162	0.2341E+07	7.0
4103	3.93	522.5	464.2	1234.	1.41	0.270E+06	58.2	0.130	0.2843E+07	13.4
4104	3.93	522.5	473.6	1572.	1.82	0.229E+06	49.0	0.120	0.3192E+07	20.5
4105	3.93	522.6	482.1	1987.	2.33	0.190E+06	40.5	0.109	0.3508E+07	30.4
4106	3.93	522.7	492.4	2325.	2.76	0.143E+06	30.3	0.109	0.3580E+07	39.9

(b) P = 3.9 MPa, Tin = 230 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSHB (K)	XB (-)	Q80 (W/M2)	DP (KPA)
4201	3.93	522.4	487.5	743.	0.88	0.165E+06	34.9	0.211	0.1832E+07	6.5
4202	3.93	522.4	484.6	856.	1.01	0.178E+06	37.9	0.197	0.2068E+07	7.9
4203	3.93	522.5	491.9	1162.	1.38	0.144E+06	30.5	0.177	0.2441E+07	14.2
4204	3.93	522.5	498.5	1503.	1.80	0.114E+06	24.0	0.165	0.2795E+07	22.6
4205	3.93	522.6	502.2	1854.	2.24	0.973E+05	20.4	0.154	0.3134E+07	32.2
4206	3.88	521.9	503.0	2155.	2.60	0.905E+05	19.0	0.138	0.3306E+07	40.2
4207	3.88	522.0	497.3	2468.	2.94	0.117E+06	24.7	0.115	0.3627E+07	47.8
4208	3.88	522.1	498.5	2728.	3.27	0.112E+06	23.5	0.108	0.3788E+07	54.9
4209	3.88	522.1	499.8	2961.	3.56	0.106E+06	22.3	0.101	0.3866E+07	62.1
4210	3.88	522.1	501.7	3074.	3.71	0.972E+05	20.4	0.101	0.3893E+07	65.7
4211	3.88	522.2	501.0	3255.	3.92	0.101E+06	21.2	0.093	0.3977E+07	70.9
4212	3.88	522.2	502.2	3310.	4.00	0.952E+05	20.0	0.096	0.4026E+07	74.1
4213	3.88	522.2	499.3	3478.	4.18	0.109E+06	22.9	0.083	0.4089E+07	75.6
4214	3.88	522.2	499.8	3573.	4.30	0.107E+06	22.5	0.080	0.4079E+07	78.9
4215	3.88	522.3	501.7	3699.	4.46	0.979E+05	20.5	0.082	0.4119E+07	83.7
4216	3.88	522.3	502.2	3857.	4.66	0.957E+05	20.1	0.078	0.4147E+07	87.4
4217	3.88	522.3	501.7	3963.	4.78	0.981E+05	20.6	0.075	0.4217E+07	91.0
4218	3.88	522.3	500.5	4045.	4.87	0.104E+06	21.8	0.070	0.4226E+07	91.9
4219	3.88	522.4	501.7	4167.	5.03	0.983E+05	20.6	0.070	0.4260E+07	95.0
4220	3.88	522.4	502.2	4267.	5.15	0.961E+05	20.1	0.069	0.4269E+07	97.5

(c) P = 3.9 MPa, Tin = 200 °C

RUN	PR (MPA)	TSAT (K)	TIN (K)	GB (KG/M2.S)	VB (M/S)	HSUB (J/KG)	TSUB (K)	XB (-)	QBO (W/M2)	DP (KPA)
4221	3.88	521.7	465.0	722.	0.83	0.263E+06	56.7	0.202	0.2060E+07	5.6
4222	3.88	521.7	471.1	915.	1.06	0.236E+06	50.6	0.179	0.2330E+07	8.9
4223	3.88	521.7	469.1	1187.	1.37	0.245E+06	52.6	0.147	0.2763E+07	13.5
4224	3.88	521.8	470.4	1537.	1.77	0.239E+06	51.4	0.118	0.3180E+07	20.2
4225	3.88	521.8	472.8	1853.	2.14	0.229E+06	49.0	0.108	0.3583E+07	27.8
4226	3.88	521.9	475.3	2239.	2.60	0.218E+06	46.6	0.087	0.3850E+07	35.7
4227	3.88	522.0	472.3	2601.	3.00	0.231E+06	49.6	0.065	0.4161E+07	42.0
4228	3.88	522.0	475.3	2838.	3.29	0.218E+06	46.7	0.061	0.4283E+07	46.0
4229	3.88	522.0	474.0	3195.	3.70	0.224E+06	48.0	0.044	0.4483E+07	50.7
4230	3.75	520.1	470.6	3337.	3.85	0.230E+06	49.5	0.037	0.4585E+07	55.2
4231	3.88	522.0	468.7	3433.	3.95	0.248E+06	53.4	0.028	0.4748E+07	52.4
4232	3.88	522.1	473.6	3599.	4.16	0.226E+06	48.5	0.029	0.4647E+07	56.4
4233	3.67	518.9	474.0	3692.	4.27	0.209E+06	44.9	0.033	0.4585E+07	61.0

付録B 流量低下CHF実験データ

Table B-1 Result of flow reduction transient CHF experiments
 (Test section B : 7-rods, L=1.0 m, P/D=1.2)

(1) P = 3.93 MPa, Tin = 220~232 °C

$$G_0 = 2900 \text{ kg/s.m}^2, q_0 = 1.49 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	Tin (°C)	G ₀ (kg/s.m ²)	q ₀ (10 ⁶ W/m ²)	X ₀ (-)	Δt _{bo} (s)	G _{bo} (kg/s.m ²)	G _{bo} /G ₀ (%)	X _{bo} (-)
2401	3.93	220	2952	1.491	0.009	1.1	2619	88.7	0.050
2402	3.93	232	2836	1.488	0.063	1.9	2243	79.1	0.089
2403	3.93	230	2824	1.488	0.058	2.5	2167	76.7	0.089
2404	3.93	231	2847	1.493	0.058	4.2	1845	64.8	0.120
2405	3.93	225	2884	1.484	0.047	8.4	1562	54.2	0.124
2406	3.93	222	2967	1.496	0.030	0.6	2730	92.0	0.038
2407	3.93	220	2970	1.486	0.024	1.6	2500	84.2	0.043

(2) $P = 3.93 \text{ MPa}$, $T_{in} = 189 \sim 195 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_0 = 3000 \text{ kg/s.m}^2, q_0 = 1.48 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	T _{in} (°C)	G ₀ (kg/s.m ²)	q ₀ (10 ⁶ W/m ²)	X ₀ (-)	Δt _{b0} (s)	G _{b0} (kg/s.m ²)	G _{b0} /G ₀ (%)	X _{b0} (-)
2501	3.85	195	2859	1.486	-0.035	0.8	2477	86.6	-0.020
2502	3.93	190	3044	1.484	-0.059	1.4	2449	80.5	-0.032
2503	3.95	195	3013	1.484	-0.047	1.5	2459	81.6	-0.024
2504	3.95	190	3051	1.486	-0.060	2.8	2022	66.3	-0.008
2505	3.95	191	2992	1.481	-0.055	5.0	1724	57.6	0.021
2506	3.93	190	2986	1.473	-0.055	9.4	1366	45.7	0.064
2507	3.93	189	3038	1.481	-0.059	18.4	1162	38.2	0.101

(3) $P = 3.93 \text{ MPa}$, $T_{in} = 188 \sim 193 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_0 = 3000 \text{ kg/s.m}^2, q_0 = 1.82 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	T _{in} (°C)	G ₀ (kg/s.m ²)	q ₀ (10 ⁶ W/m ²)	X ₀ (-)	Δt _{bo} (s)	G _{bo} (kg/s.m ²)	G _{bo} /G ₀ (%)	X _{bo} (-)
2508	3.93	192	3007	1.830	-0.029	0.6	2710	90.1	-0.016
2509	3.93	187	3021	1.825	-0.043	1.1	2579	85.3	-0.020
2510	3.93	192	2987	1.827	-0.026	1.9	2365	79.2	0.005
2511	3.93	191	2989	1.823	-0.029	2.6	2228	74.5	0.013
2512	3.93	189	3010	1.826	-0.037	4.3	1947	64.7	0.032
2513	3.93	193	2963	1.815	-0.025	7.7	1681	56.7	0.070
2514	3.93	188	2990	1.819	-0.036	16.6	1408	47.1	0.101

(4) P = 3.8 MPa, Tin = 169~176 °C

$$G_0 = 3010 \text{ kg/s.m}^2, q_0 = 1.82 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	Tin (°C)	G ₀ (kg/s.m ²)	q ₀ (10 ⁶ W/m ²)	X ₀ (-)	Δt _{bo} (s)	G _{bo} (kg/s.m ²)	G _{bo} /G ₀ (%)	X _{bo} (-)
2515	3.63	169	2988	1.841	-0.071	0.8	2612	87.4	-0.053
2516	3.83	173	2972	1.827	-0.071	1.1	2531	85.2	-0.047
2517	3.86	175	3009	1.820	-0.070	2.0	2343	77.9	-0.034
2518	3.85	173	3039	1.831	-0.072	2.7	2215	72.9	-0.028
2519	3.76	173	3012	1.825	-0.069	4.6	1891	62.8	0.005
2520	3.84	176	3013	1.821	-0.061	8.1	1686	56.0	0.030
2521	3.78	171	3033	1.819	-0.079	16.0	1452	47.9	0.059
2522	3.87	171	2990	1.819	-0.079	0.7	2673	89.4	-0.066

(5) P = 3.9 MPa, Tin = 211~219 °CG₀ = 2920 kg/s.m², q₀ = 1.81x10⁶ W/m²

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	Tin (°C)	G ₀ (kg/s.m ²)	q ₀ (10 ⁶ W/m ²)	X ₀ (-)	Δt _{bo} (s)	G _{bo} (kg/s.m ²)	G _{bo} /G ₀ (%)	X _{bo} (-)
2523	3.88	219	2905	1.809	0.049	0.5	2729	93.9	0.057
2524	3.91	214	2972	1.814	0.032	0.9	2602	87.6	0.048
2525	3.93	216	2937	1.812	0.039	1.6	2435	82.9	0.063
2526	3.93	218	2915	1.813	0.046	2.3	2328	80.0	0.073
2527	3.93	211	2961	1.812	0.024	3.7	2060	69.6	0.078
2528	3.93	217	2907	1.812	0.043	7.5	1765	60.7	0.126
2529	3.93	215	2901	1.803	0.037	14.7	1571	54.2	0.145
2530	3.93	219	2862	1.815	0.048	0.5	2671	93.3	0.059
2531	3.93	215	2875	1.815	0.036	0.58	2642	91.9	0.048

(6) P = 1.08 MPa, Tin = 133~138 °CG_θ = 3306~3350 kg/s.m², q_θ = 1.54x10⁶ W/m²

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	Tin (°C)	G _θ (kg/s.m ²)	q _θ (10 ⁶ W/m ²)	X _θ (-)	Δt _{BO} (s)	G _{BO} (kg/s.m ²)	G _{BO} /G _θ (%)	X _{BO} (-)
2620	1.08	138	3350	1.541	-0.020	0.55	3063	91.4	-0.008
2621	1.08	133	3006	1.541	-0.021	0.85	2596	86.4	0.000

Table B-2 Result of flow reduction transient CHF experiments
 (Test section C : 7-rods, L=0.5 m, P/D=1.123)

(1) P = 3.9 MPa, Tin = 230 °C

G₀ = 3000 kg/s·m², q₀ = 1.37x10⁶ W/m²

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	Tin (°C)	G ₀ (kg/s·m ²)	q ₀ (10 ⁶ W/m ²)	X ₀ (-)	△t _{bo} (s)	G _{bo} (kg/s·m ²)	G _{bo} /G ₀ (%)	X _{bo} (-)
3201	3.93	222	2988	1.379	0.000	17.3	1101	36.8	0.132
3202	3.93	223	3043	1.374	0.004	6.5	1496	49.2	0.084
3203	3.93	228	3048	1.370	0.015	6.6	1545	50.7	0.089
3204	3.93	227	3006	1.365	0.014	4.2	1877	62.4	0.060
3205	3.91	228	2983	1.367	0.018	3.6	2014	67.1	0.054
3206	3.91	228	2947	1.368	0.020	2.8	2084	70.7	0.052
3207	3.91	228	2930	1.356	0.020	2.0	2304	78.6	0.040
3208	3.91	229	2875	1.361	0.023	1.1	2472	86.0	0.035
3209	3.91	225	2906	1.361	0.012	0.7	2646	91.1	0.021

(2) $P = 3.9 \text{ MPa}$, $T_{in} = 230^\circ\text{C}$

$$G_\theta = 1450 \text{ kg/s.m}^2, q_\theta = 1.37 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	T_{in} (°C)	G_θ (kg/s.m ²)	q_θ (10 ⁶ W/m ²)	X_θ (-)	Δt_{bo} (s)	G_{bo} (kg/s.m ²)	G_{bo}/G_θ (%)	X_{bo} (-)
3210	3.93	222	1415	1.373	0.085	15.8	1327	93.8	0.116
3211	3.93	227	1460	1.358	0.091	6.0	1390	95.2	0.088
3212	3.93	231	1485	1.358	0.099	3.0	977	65.8	0.167
3213	3.93	230	1439	1.363	0.102	2.2	1135	78.9	0.147
3214	3.93	226	1493	1.364	0.087	1.5	1179	79.0	0.137
3215	3.93	230	1430	1.359	0.104	0.6	1271	88.8	0.113

(3) P = 3.9 MPa, Tin = 200 °C

$$G_0 = 3200 \text{ kg/s.m}^2, q_0 = 1.57 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Run No.	Initial conditions					Test results			
	P (MPa)	Tin (°C)	G ₀ (kg/s.m ²)	q ₀ (10 ⁶ W/m ²)	X ₀ (-)	△t _{BO} (s)	G _{BO} (kg/s.m ²)	G _{BO} /G ₀ (%)	X _{BO} (-)
3301	3.93	201	3174	1.578	-0.048	25.4	945	29.8	0.134
3302	3.89	200	3122	1.572	-0.048	9.3	1310	42.0	0.071
3303	3.86	199	3325	1.578	-0.053	4.8	1755	52.8	0.019
3304	3.86	200	3349	1.559	-0.054	2.5	2309	68.9	-0.016
3305	3.87	199	2982	1.569	-0.047	1.3	2466	82.7	-0.028
3306	3.88	196	3098	1.561	-0.057	1.1	2598	83.9	-0.039
3307	3.88	197	3360	1.562	-0.061	0.9	2886	85.9	-0.047
3308	3.88	196	3223	1.569	-0.060	0.7	2955	91.7	-0.050
3309	3.89	197	3077	1.559	-0.056	0.7	2775	90.2	-0.046

付録C C H F相関式

(1) WSC-2 (Triangular) 相関式

文 献 : R.W. Bowring, WSC-2: A Subchannel Dryout Correlation for Water-Cooled Clusters over the Pressure Range 3.4-15.9 MPa (500-2300 Psia), AEEW-R983 (1979).

本式は、Barnett によって提唱された局所条件モデルと、CHFが入口サブクール度と線型関係にあるという実験結果を組み合せて定式化したものである。本式はサブチャンネル解析コードと組み合せて使用する。

WSC-2 (Triangular) 相関式

$$\phi_c (10^6 \text{ Btu/hr. ft}^2) = \frac{A + B \Delta H_i}{C + Z Y Y'}$$

$$A = \frac{0.25 G D \lambda F_1 Q_1}{1 + Q_2 F_2 G D(Y')^{Q_3}}$$

$$B = 0.25 G D$$

$$C' = \frac{Q_4 F_3 (G D Y')^{0.5}}{D_w}$$

$$C = C' V \left[1 + \frac{Y - 1}{1 + G} \right]$$

ここで、 ΔH_i = 入口サブクール度 (Btu/lb)

Z = 入口からの距離 (in)

Y = 軸方向熱流束分布パラメータ

$$= \left[\frac{1}{Z} \int_0^Z \bar{\phi} dz \right] / \bar{\phi}$$

Y' = サブチャンネルインバランスファクター

D = $F_p D_h$

D_h = 热的等価直径 (in)

F_p = 半径方向ピーキングファクター

D_w = 水力等価直径 (in)

$P_r = 10^{-3} P$: P = 壓力 (psia)

$F_1 = P_r^{0.982} \exp [1.17 (1 - P_r)]$

$F_2 = P_r^{0.841} \exp [1.424 (1 - P_r)]$

$F_3 = P_r^{1.851} \exp [1.241 (1 - P_r)]$

G = 質量速度 ($10^6 \text{ lb}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr}$)

λ = 蒸発の潜熱 (Btu/lb)

形状ファクター $-Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ は三角格子炉心においては次の値となる。

$$Q_1 = 1.329, Q_2 = 1.372, Q_3 = -1.0, Q_4 = 12.26$$

スペーサファクター、 V 、はスペーサの形状により異なり、次式で与えられる。

(1) 圧力管型原子炉 (P T R) 及び沸騰水型原子炉 (B W R) の場合

$$V = 1.0$$

(2) 加圧水型原子炉 (P W R) の混合羽根付グリッドスペーサの場合

$$V = 0.7$$

(3) P W R の保守的評価の場合

$$V = 0.85$$

サブチャンネルインバランスファクタ - Y' 及び半径方向ピーキングファクタ - F_p については(2)K f K相関式の項で述べる。

本相関式のデータベース

No. of rods	4 ~ 37
Lattice	Square, Circle
Length (in.)	18 ~ 180
Rod dia. (in.)	0.402 ~ 0.780
Spacer	Grid, Wart, Pins, Coil, Ferrule Vane, Egg, Crate, BWR
Axial flux	Uniform, Nonuniform
F_p	1.0 ~ 1.32
D_h (in.)	0.296 ~ 1.441
D_w (in.)	0.232 ~ 1.059
Pressure (psia)	435 ~ 2405
No. Points	1209

(2) K f K相関式

文 献 : M. Dalle Donne and W. Hame, Critical Heat Flux Correlation for Triangular Arrays of Rod Bundles with Tight Lattices, including the Spiral Spacer Effect, Nuclear Technology Vol.71 Oct. (1985).

本式は、Bowring が開発したW S C - 2 相関式の形状パラメータ及びスペーサファクターを、稠密格子炉心のバーンアウトデータを用いて再定義したものである。なお、本式は、流路シユラウドの効果のない三角配列格子の中心サブチャンネルのみに適用される。また、原論文では大規模集合体への適用を目的としているのでW S C - 2式のサブチャンネルインバランスファクターは考慮していないが、小規模実験ではこのファクターも考慮する必要が生じると考えられるので、本ファクターを入れた形で収録する。

K f K相関式

$$\phi_c (10^6 \text{ Btu/hr. ft}^2) = \frac{A + B \Delta H_i}{C + Z Y Y'}$$

$$A = \frac{0.25 G D \lambda F_1 Q_1}{1 + Q_2 F_2 G D (Y')^{Q_3}}$$

$$B = 0.25 G D$$

$$C = \frac{Q_4 F_3 (G D Y')^{0.5}}{D_h}$$

$$C' = C' V \left[1 + \frac{Y - 1}{1 + G} \right]$$

ここで、 ΔH_i = 入口サブクール度 (Btu/lb)

Z = 入口からの距離 (in)

Y = 軸方向熱流束分布パラメータ

$$= \left[\frac{1}{Z} \int_0^Z \bar{\phi} dz \right] / \bar{\phi}$$

Y' = サブチャンネルインバランスファクター (注1)

$$D = F_p D_h$$

D_h = 中心サブチャンネル水力等価直径 (in)

F_p = 半径方向出力分布ファクター (注2)

$$P_r = 10^{-3} P : P = \text{圧力 (psia)}$$

$$F_1 = P_r^{0.982} \exp [1.17 (1 - P_r)]$$

$$F_2 = P_r^{0.841} \exp [1.424 (1 - P_r)]$$

$$F_3 = P_r^{1.851} \exp [1.241 (1 - P_r)]$$

$$G = \text{質量速度 } (10^6 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{hr})$$

$$\lambda = \text{蒸発の潜熱 (Btu/lb)}$$

形状ファクター Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 は三角格子稠密格子炉心においては次の値となる。

$$Q_1 = 1.748, Q_2 = 7.540, Q_3 = -1.0, Q_4 = 8.783$$

スペーサファクター、V、はスペーサーの形状により異なり、次式で与えられる。

(1) グリッドスペーサ (Bettis Atomic Power Laboratoryのデータ)

$$V = -0.252 - 2.789 \exp (-3.874 G) \\ + 1.915 \exp (-0.234 G)$$

(2) スパイラルスペーサ

ただし、ロッドピッチ/ロッド径 (p/d) = 1.051、スパイラルスペーサの軸方向ピッヂ/ロッド径 (H/d) = 13.64 の場合 (コロンビア大学のデータ)

$$V = 1 - [0.336 + 0.09G - 0.697 \exp (-2.68G)]$$

(3) (2)以外の $p/d, H/d$ のスパイラルスペーサ

$$1.02 < p/d < 1.36, 1.36 < H/d < 50 \text{ の範囲}$$

$$V = 1 - 2.6695 (F^{0.915} - 1) \\ \times [0.336 + 0.09G - 0.697 \exp (-2.68G)]$$

$$F = \left(\frac{P}{d} \right)^{0.5} + \left[7.6 \frac{(p/d)^3}{H/d} \right]^{2.16}$$

(注1) サブチャンネルインバランスファクター：Y'

Y' はサブチャンネル間のエンタルピー移動の効果を考慮するパラメータで次式で定義される。

$$Y' = \text{サブチャンネル内に保持されている熱量} / \text{サブチャンネル内で発生した熱量} \\ = 0.25 G D_h (H - H_i) / \left[\int_0^Z \bar{\phi} dz \right]$$

すなわち、ホットサブチャンネルとコールドチャンネルが隣接している場合には、前者で $Y' < 1$ 、後者で $Y' > 1$ となる。なお、同一形状サブチャンネルが多数個連続している場合には $Y' \sim 1$ となる。

ここで、G 及び H はサブチャンネル解析により求める。

(注2) 半径方向出力分布ファクター：F_p

F_p は全バンドルに対する半径方向ピーキングファクターではなく、注目するサブチャンネルに面するホットロッドの出力比をとる。

すなわち r_1, r_2, r_3 の出力ピーキング（ただし、 $r_1 > r_2, r_1 > r_3$ とする）を有する3本のロッドに囲まれたサブチャンネルでは、各ロッドのぬれ縁長さをそれぞれ a_1, a_2, a_3 とすると、

$$F_p = (a_1 + a_2 + a_3) r_1 / (a_1 r_1 + a_2 r_2 + a_3 r_3)$$

となる。

(例)

$a_1 = a_2 = a_3, r_1 = 1.0, r_2 = r_3 = 0.9$ の場合 $F_p = 1.0714$ となる。

$a_1 = a_2 = a_3, r_1 = r_2 = 1.0, r_3 = 0.0$ の場合 $F_p = 1.5$ となる。

なお、この場合 $F_p D_h$ は熱的等価直徑に等しい。

本相関式のデータベース

JAERI-M 90-044

Data Source (Ref.)	Spacer Type	Number of Rods	Rod Diameter (in.)	Pitch to Diameter Ratio	Heated Rod Length (in.)	Infinite Array Hydraulic Diameter (in.)	P (psia)	$G \times 10^{-6}$ (lb/h·ft ²)	Average Exit Quality	Number of Data Points
17	Warts	20	0.75	1.02	94	0.110	1200 ÷ 2000	0.254 ÷ 3.02	0.14 ÷ 0.85	51
15	Grid	20	0.25	1.36	54	0.260	1200 ÷ 2000	0.248 ÷ 3.62	-0.44 ÷ 0.69	75
			0.25	1.36	54	0.260	1195 ÷ 2008	0.232 ÷ 2.00	-0.01 ÷ 0.69	25
			0.25	1.36	54	0.260	1200 ÷ 2000	0.247 ÷ 2.01	-0.34 ÷ 0.64	33
			0.25	1.36	33	0.260	1200 ÷ 2000	0.249 ÷ 3.00	-0.11 ÷ 0.48	26
			0.28	1.21	54	0.175	1200 ÷ 2000	0.248 ÷ 4.00	-0.17 ÷ 0.75	45
			0.28	1.21	54	0.175	400 ÷ 2000	0.05 ÷ 3.03	-0.02 ÷ 0.96	70
19	Wire	12	0.44	1.051	17	0.0903	1200	0.48 ÷ 4.09	-0.02 ÷ 0.53	44
	Composite		$\frac{0.25}{0.75}$	$\frac{1.02}{1.36}$	$\frac{17}{94}$	$\frac{0.09}{0.26}$	400 ÷ 2000	0.05 ÷ 4.09	-0.44 ÷ 0.96	369

(3) E P R I - B & W 相関式

文 献 : V.O. Uotinen et al., "Technical Feasibility of a Pressurized Water Reactor Design with a Low-Water-Volume-Fraction Lattice, EPRI-NP-1833, (1981).

本式は、エネルギーバランスを考慮した準実験式で、B & WとV P I & S U (Virginia Polytechnic Institute and State University) の共同研究により得られたものである。データベースは、主として三角配列格子であるが、軸方向非一様加熱の場合については正方配列格子のデータも使用している。

E P R I - B & W 相関式

$$\phi_c = A_1 \left[\frac{DG}{h_z - h_i} \frac{\partial h}{\partial z} \right]^{A_2} + A_3 \left[\frac{DG}{h_z - h_i} \frac{\partial h}{\partial z} \right]^{A_4} \left[A_5 (\Delta H_s) + \frac{\partial h_f}{\partial P} (2000 - P) \right]$$

ここで、 ϕ_c = 限界熱流束 ($10^6 \text{ Btu}/\text{hr. ft}^2$)

D = 热的等価直径 (in)

G = 局所質量速度 ($10^6 \text{ lb}/\text{hr. ft}^2$)

h_z, h_i = 局所及び入口エンタルピ (Btu/lb)

$\partial h/\partial z$ = 局所エンタルピ勾配 ($\text{Btu/lb} \cdot \text{in}$)

ΔH_s = 入口サブクーリング (Btu/lb)

h_f = 鮎和水エンタルピ (Btu/lb)

P = 系圧力 (psia)

$\partial h_f/\partial P$ = 鮎和水エンタルピ曲線の勾配 ($\text{Btu/lb} \cdot \text{psi}$)

(0.123 の一定値を使用)

$A_1 \sim A_5$ は、実験データの最小二乗近似により求めた。

$A_1 = 2.8591$

$A_2 = 0.51796$

$A_3 = 0.023018$

$A_4 = 0.63960$

$A_5 = 1.2614$

本相関式のデータベース

Data source	Pressure (psia)	Mass flux (10^6 lb/h-ft^2)	Inlet subcooling (°F)	Hydraulic diameter (in)	No of points
WAPD-TM-466	1200 - 2000	1.0 - 4.2	40 - 440	0.142 - 0.152	53
WAPD-TM-1013	1200 - 2000	1.0 - 4.0	30 - 400	0.175 - 0.260	148
W/ESADA	1500 - 2425	2.0 - 3.6	30 - 140	0.85	47
Composite	1200 - 2425	1.0 - 4.2	30 - 440	0.142 - 0.85	248

(4) E P R I - Columbia 相関式

文 献 : D.G. Reddy and C.F. Fighetti, "Parametric Study of CHF Data, volume 2. A Generalized Subchannel CHF Correlation for PWR and BWR Fuel Assemblies", EPRI-NP-2609, vol.2, (1983).

本式は、サブチャンネル解析コード COBRA-IIICにより計算される局所条件を用いて CHFを求める相関式で、PWR及びBWRの通常運転時ののみならず、LOCA時等の事故時にも適用できることを目的として、広範囲なCHFデータベースに基づいている。

E P R I - Columbia 相関式

$$\phi_c = \frac{A - X_{in}}{C F_g C_{nu} + \left[\frac{X_l - X_{in}}{\phi_l} \right]}$$

$$A = P_1 P_r^{P2} G (P_5 + P_7 P_r)$$

$$C = P_3 P_r^{P4} G (P_6 + P_8 P_r)$$

ここで、 ϕ_c = 限界熱流束 (M. Btu/hr-ft²)

ϕ_l = 局所熱流束 (M. Btu/hr-ft²)

X_{in} = 入口クオリティ

X_l = 局所クオリティ

G = 質量速度 (M. 1bs/hr-ft²)

P_r = 規格化圧力 (圧力/臨界圧力)

P₁ ~ P₈ : 65種類のテスト部から得られた 3607 点のCHFデータより得た最適値

$$P_1 = 0.5328$$

$$P_2 = 0.1212$$

$$P_3 = 1.6151$$

$$P_4 = 1.4066$$

$$P_5 = -0.3040$$

$$P_6 = 0.4843$$

$$P_7 = -0.3285$$

$$P_8 = -2.0749$$

$$F_g = \text{グリットスペーサファクター} \\ = 1.3 - 0.3 C_g$$

C_g = グリットスペーサ損失係数

C_{nu} = 軸方向非一様加熱効果修正係数

C_{nu} は次式で定義される。なおこれは KfK の式の修正係数と同一である。

$$C_{nu} = 1 + \frac{Y - 1}{1 + G}$$

$$Y = \left[\frac{1}{Z} \int_0^Z \bar{\phi} dZ \right] / \bar{\phi}$$

$\phi = \overline{\phi}(Z)$: 局所熱流束

実際の DNB 発生時には $\phi_c = \phi_1$ となるので ϕ_c は以下の形で表現できる。

$$\phi_c = \frac{A - X_1}{C F_g C_{nu}}$$

本相関式のデータベースの範囲

Mass flux	0.2	to	4.1	M. lbs/hr-ft ²
Pressure	200	to	2450	psia
Local quality	- 0.25	to	0.75	
Inlet quality	- 1.10	to	0.0	
Length	30	to	168	inches
Hyd. diameter	0.35	to	0.55	inches
Rod diameter	0.38	to	0.63	inches

(5) Katto (Annuli) 相関式

文 献 : Y. Katto "Generalized Correlations of Critical Heat Flux for the Forced Convection Boiling in Vertical Uniformly Heated Annuli", Int. J. Heat Mass Transfer vol.22, pp.575-584 (1979).

甲藤によると、無次元解析により、限界熱流束 ϕ_c は以下の式で表現できる。

$$\phi_c = \phi_{co} \left(1 + K \frac{\Delta H_i}{H_{fg}} \right)$$

$$\frac{\phi_{co}}{GH_{fg}} = f \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}, \frac{\sigma \rho_l}{G^2 l}, \frac{l}{d} \right)$$

ここで、 ϕ_{co} = 入口サブクール度 = 0 の場合の限界熱流束

K = ΔH_i の影響に関する係数

ΔH_i = 入口サブクールエンタルピ

H_{fg} = 蒸発潜熱

G = 質量速度

ρ_v = 蒸気密度

ρ_l = 液体密度

σ = 表面張力

l = 加熱管長

d = 代表直徑

限界熱流束特性を各種流体について調べたところ、次の4領域に分類できる。

L - 領域 (低流量)

H - 領域 (主として高流量)

N - 領域 (高流量で上記の関係が成立しない領域)

H P - 領域 (高流量かつ高圧力)

甲藤は、円管、環状流路、及び長方形流路等について、上記各領域に対応する相関式を提案している。バンドル形状については相関式は導出されていないので、全流路の熱的等価直経を代表径とした環状流路用相関式を収録する。

甲藤 - 環状流路用相関式

(a) 領域の境界

L - H 領域の境界

$$\left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{L-H} = 1 / \left(0.48 \left(\frac{\rho_v}{\rho_1}\right)^{0.133} \left(\frac{\sigma \rho_1}{G^2 \ell}\right)^{0.29} - 0.0081 \right)$$

H - N 領域の境界

$$\left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{H-N} = 0.0206 / \left(\frac{\sigma \rho_1}{G^2 \ell}\right)^{0.584}$$

環状流路については、H P - 領域のデータが不足しており、相関式は導出できない。

具体的には以下のようにして領域を決定する。

$$\left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{L-H} < 0 \text{ の場合}$$

$$\left(\frac{\ell}{d_{he}}\right) \geq \left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{H-N} \text{ なら } H - \text{領域}$$

$$\left(\frac{\ell}{d_{he}}\right) < \left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{H-N} \text{ なら } N - \text{領域}$$

$$\left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{L-H} > 0 \text{ の場合}$$

$$\frac{\ell}{d_{he}} \geq \left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{L-H} \text{ なら } L - \text{領域}$$

$$\left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{H-N} \leq \frac{\ell}{d_{he}} < \left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{L-H} \text{ なら } H - \text{領域}$$

$$\frac{\ell}{d_{he}} < \left(\frac{\ell}{d_{he}}\right)_{H-N} \text{ なら } N - \text{領域}$$

(b) 各領域の相関式

L - 領域

$$\frac{\phi_{co}}{GH_{fg}} = 0.25 \left(\frac{\sigma \rho_1}{G^2 \ell}\right)^{0.043} \times \frac{\ell}{d_{he}}$$

$$K = 1.0$$

H - 領域

$$\frac{\phi_{co}}{GH_{fg}} = 0.12 \left(\frac{\rho_v}{\rho_1}\right)^{0.133} \left(\frac{\sigma \rho_1}{G^2 \ell}\right)^{1/3} \left(1 + 0.0081 \frac{\ell}{d_{he}} \right)$$

$$K = 0.057 \left(\frac{69.2}{\ell/d_{he}} \right)^{11.0} \left(\frac{\rho_v/\rho_1}{G^2 \ell} \right)^{-1/3}$$

N-領域

$$\frac{\phi_{co}}{GH_{fg}} = 0.22 \left(\frac{\rho_v}{\rho_1} \right)^{0.133} \left(\frac{\sigma \rho_1}{G^2 \ell} \right)^{0.433} \frac{(\ell/d_{he})^{0.171}}{1 + 0.0081 \ell/d_{he}}$$

$$K = 0.0$$

付録D COBRA-IV-I コードによるサブチャンネル解析結果

本付録に収録した C O B R A - I V - I コードによる解析は、すべて、Table 3.1に示した基準入力パラメータを用いて計算したものである。

- 1) Run 3313の計算に使用した入力データをTable D-1に示す。
- 2) Table 3.4に示した 48 ランについて、C O B R A - I V - I コードによる解析結果をFig. D.1～Fig. D.48に示す。ここでは、代表的なサブチャンネル 1, 3, 4, 10 (Fig. 3.13参照) における、質量速度、熱平衡クオリティ、エンタルピ、及びボイド率の軸方向分布を示した。

Table D.1 COBRA-IV-I input data for steady-state CHF experiment Run 3313

99999	3313	0	HCPWR	7-ROD BURNOUT TEST (L=0.5 M, P=10.7 MM)		
1	1	.25	0	0		
1-070	104	-	.01613	312.8	71.99	1106.8
6.869	176	-	.01649	54.55	143.99	1136.6
14.69	212	-	.01672	26.80	180.16	1150.5
50.281	0	0.017274	8.5140	250.2	1174.1	0.491
100.	327.8	0.017740	4.4310	298.5	1187.2	0.410
150.	358.4	0.01809	3.0139	330.6	1194.1	0.369
200.	381.8	0.01839	2.2873	355.5	1198.3	0.345
250.	401.0	0.01865	1.8432	376.1	1201.1	0.326
300.	417.4	0.01889	1.5427	394.0	1202.9	0.306
350.	431.7	0.01912	1.3255	409.8	1204.0	0.301
400.	444.6	0.01934	1.1610	424.2	1204.6	0.290
435.	1452.9	0.01948	1.0672	433.5	1204.8	0.2748
507.	6468.5	0.01978	.9135	451.3	1204.6	0.2645
551.	1477.2	0.01994	.8400	461.2	1204.3	0.2590
580.	2482.5	0.02006	.7969	467.5	1203.9	0.2556
609.	2487.8	0.02017	.7578	473.6	1203.5	0.2526
652.	7494.6	0.02033	.7054	482.4	1202.8	0.2482
870.	2528.1	0.02112	.5196	521.8	1197.3	0.2302
1160.	563.0	0.02217	.3768	566.3	1186.5	0.2121
1450.	591.7	0.02327	.2890	605.3	1172.7	0.1921
1885.	627.4	0.02510	.2050	658.6	1146.6	0.1791
2176.	647.8	0.02656	.1656	692.6	1124.2	0.1676
2321.	657.2	0.02740	.1491	709.6	1111.3	0.1618
2466.	666.1	0.02835	.1341	727.3	1097.6	0.1557
2901.	690.3	0.03263	.0941	785.3	1039.7	0.1340
31.6	-.25	0.0	.316	-.25	0.0	0.0
3	2	0.	0	0	0	0.0
0.	1.	1.	1.			
4	18	18				
1.	0.0219	.588	.588	2.0472	6.0472	
2.	0.0219	.588	.588	3.0472	9.0472	7.0472
3.	0.0219	.588	.588	4.0472	11.0472	
4.	0.0219	.588	.588	5.0472	13.0472	
5.	0.0219	.588	.588	6.0472	15.0472	
6.	0.0219	.588	.588	17.0472		
7.	0.04691	0.009	.588	8.0547	18.0547	
8.	0.0123	.449	.196	9.0547		
9.	0.04691	0.009	.588	10.0547		

10	-0.0123	.449	-.196	11	.0547
11	-0.04691	.009	.588	12	.0547
12	-0.0123	.449	-.196	13	.0547
13	-0.04691	.009	.588	14	.0547
14	-0.0123	.449	-.196	15	.0547
15	-0.04691	.009	.588	16	.0547
16	-0.0123	.449	-.196	17	.0547
17	-0.04691	.009	.588	18	.0547
18	-0.0123	.449	-.196	7	2
7	2	0	2	1	0
-300	1	-700	1	0	0
-1	1	0	1	0	0
2	1	0	2	1	0
3	1	0	3	1	0
4	1	0	4	1	0
5	1	0	5	1	0
6	1	0	6	1	0
7	1	0	7	1	0
8	1	0	8	1	0
9	1	0	9	1	0
10	1	0	10	1	0
11	1	0	11	1	0
12	1	0	12	1	0
13	1	0	13	1	0
14	1	0	14	1	0
15	1	0	15	1	0
16	1	0	16	1	0
17	1	0	17	1	0
18	1	0	18	1	0
8	7	7	0	1	0
0	1	.3741.180	1.1667	2	.1667
0	2	.374.9700	1.1667	2	.1667
0	3	.374.9700	2.1667	7	.25
0	4	.374.9700	3.1667	9	.25
0	5	.374.9700	3.1667	4.1667	.25
0	6	.374.9700	4.1667	5.1667	.25
0	7	.374.9700	5.1667	6.1667	.25
9	0	0	6.1667	1.1667	.25
19	.69	0.0	0	0	0
20	100	100	100	100	100

10	0	5	0
.003	0.0		
0.0	.003	.15	.003
11	1	0	0
570.0		454.9	
12	3	3	1
1	7	8	
1	3	13	

TEST A RUN 306

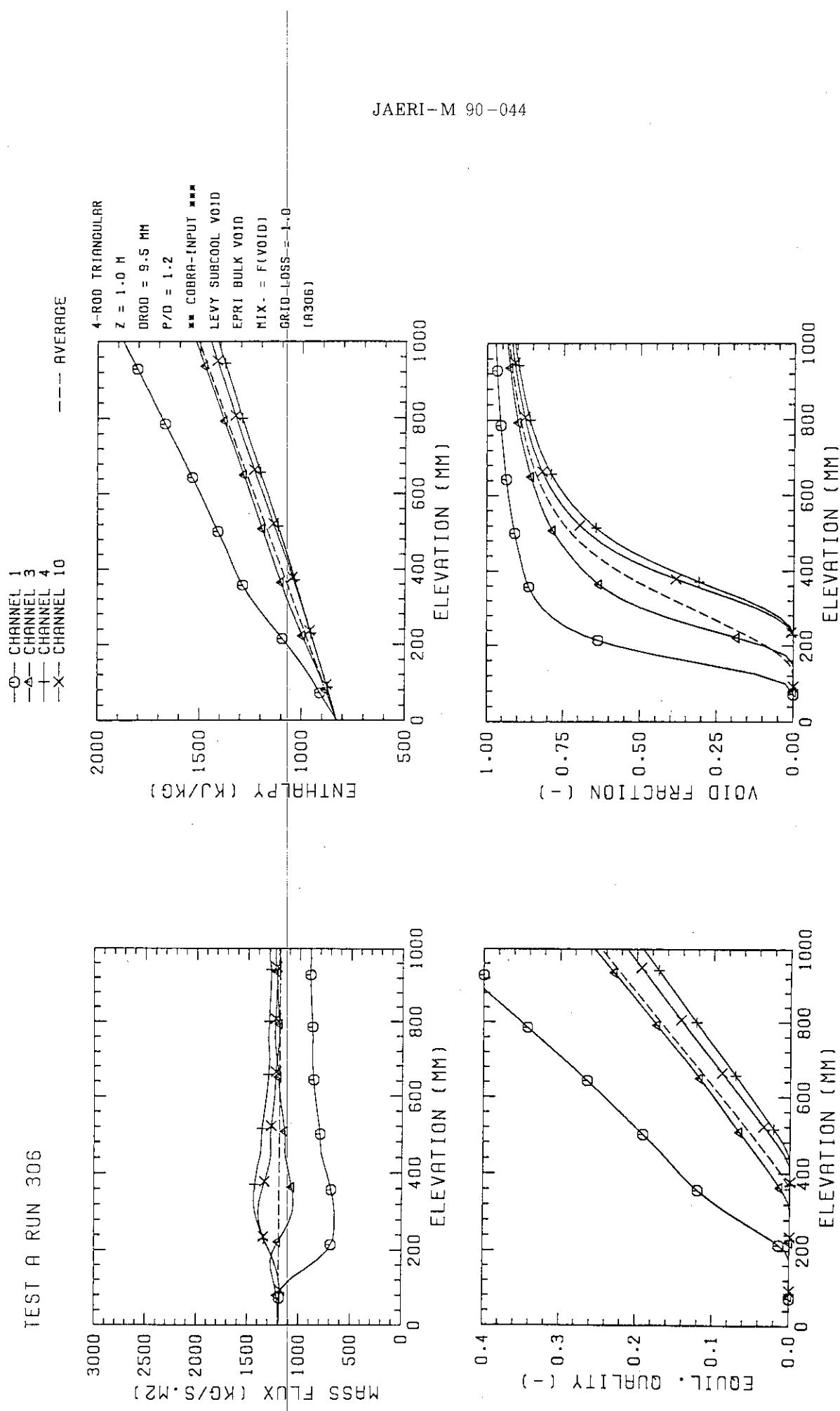


Fig. D.1 COBRA-IV-I analysis results (Run 306)

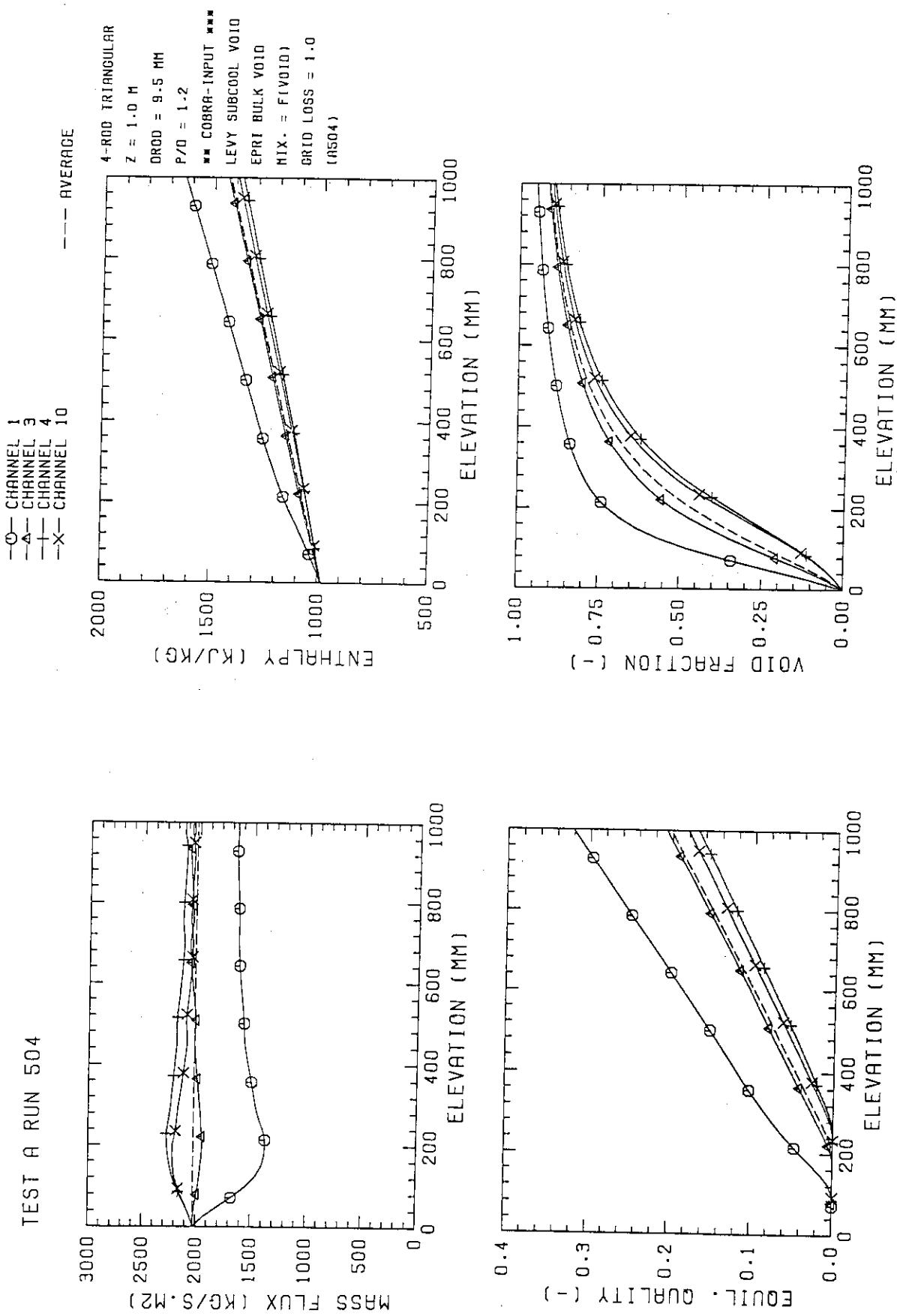


Fig. D.2 COBRA-IV-I analysis results (Run 504)

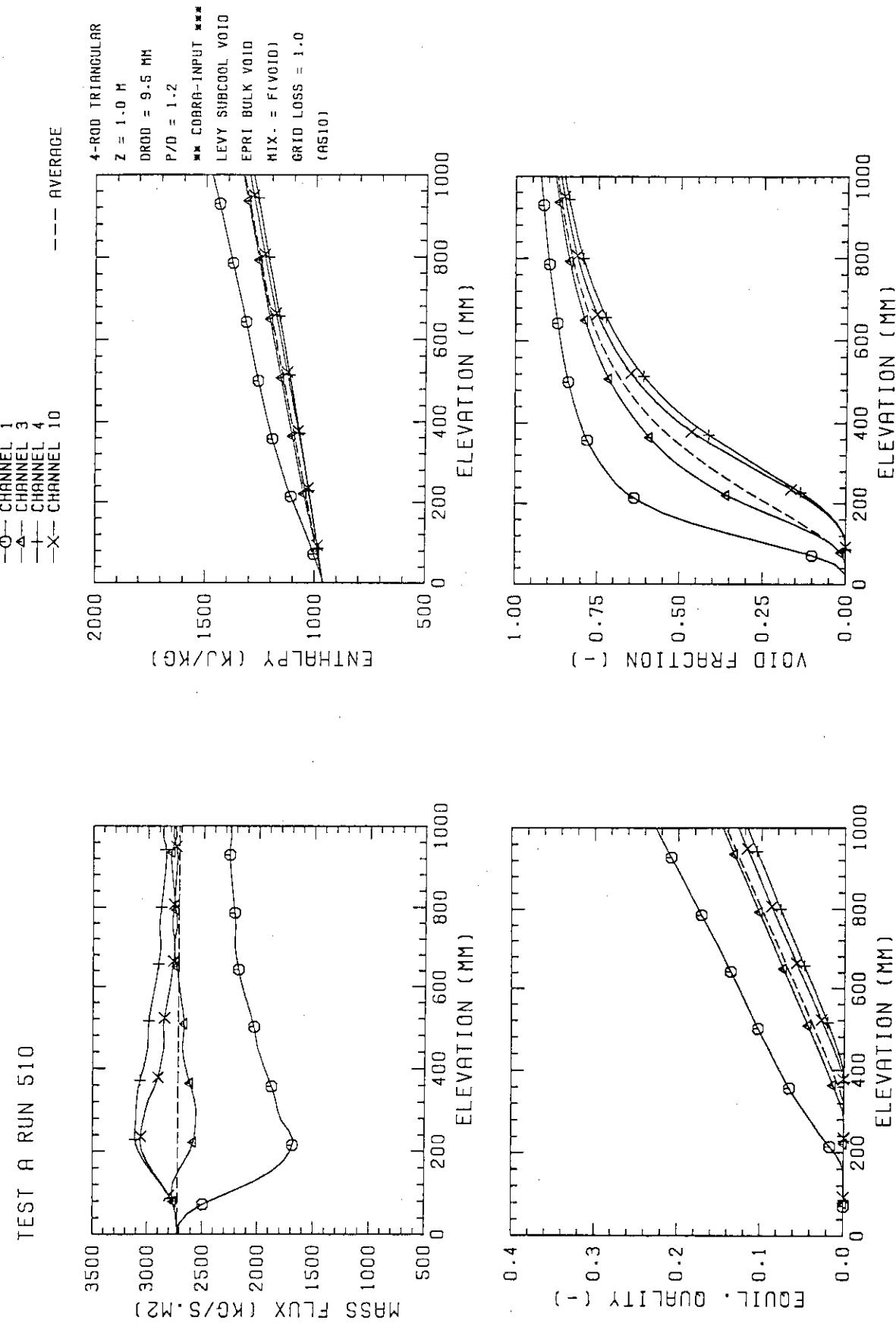


Fig. D.3 COBRA-IV-I analysis results (Run 510)

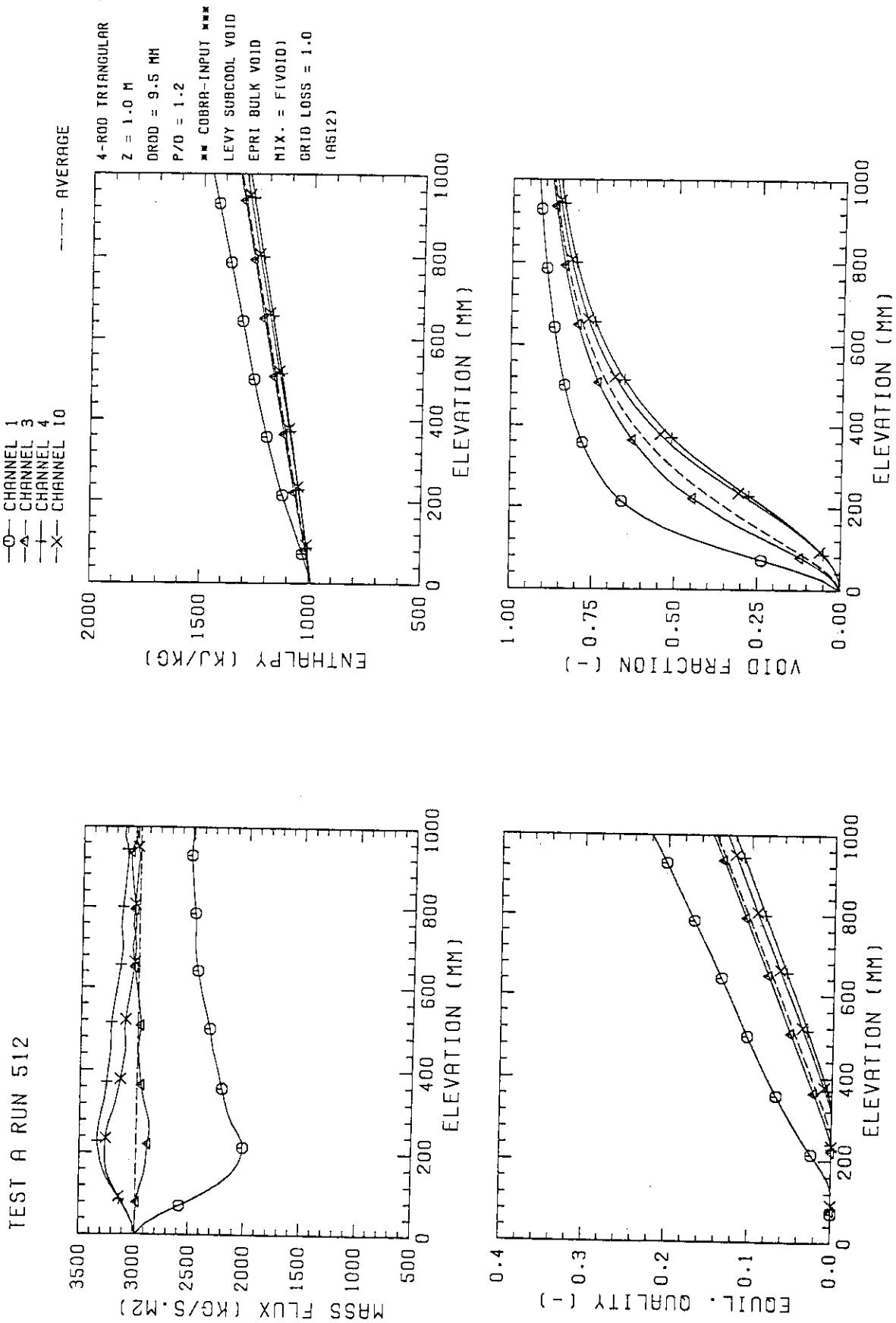


Fig. D.4 COBRA-IV-I analysis results (Run 512)

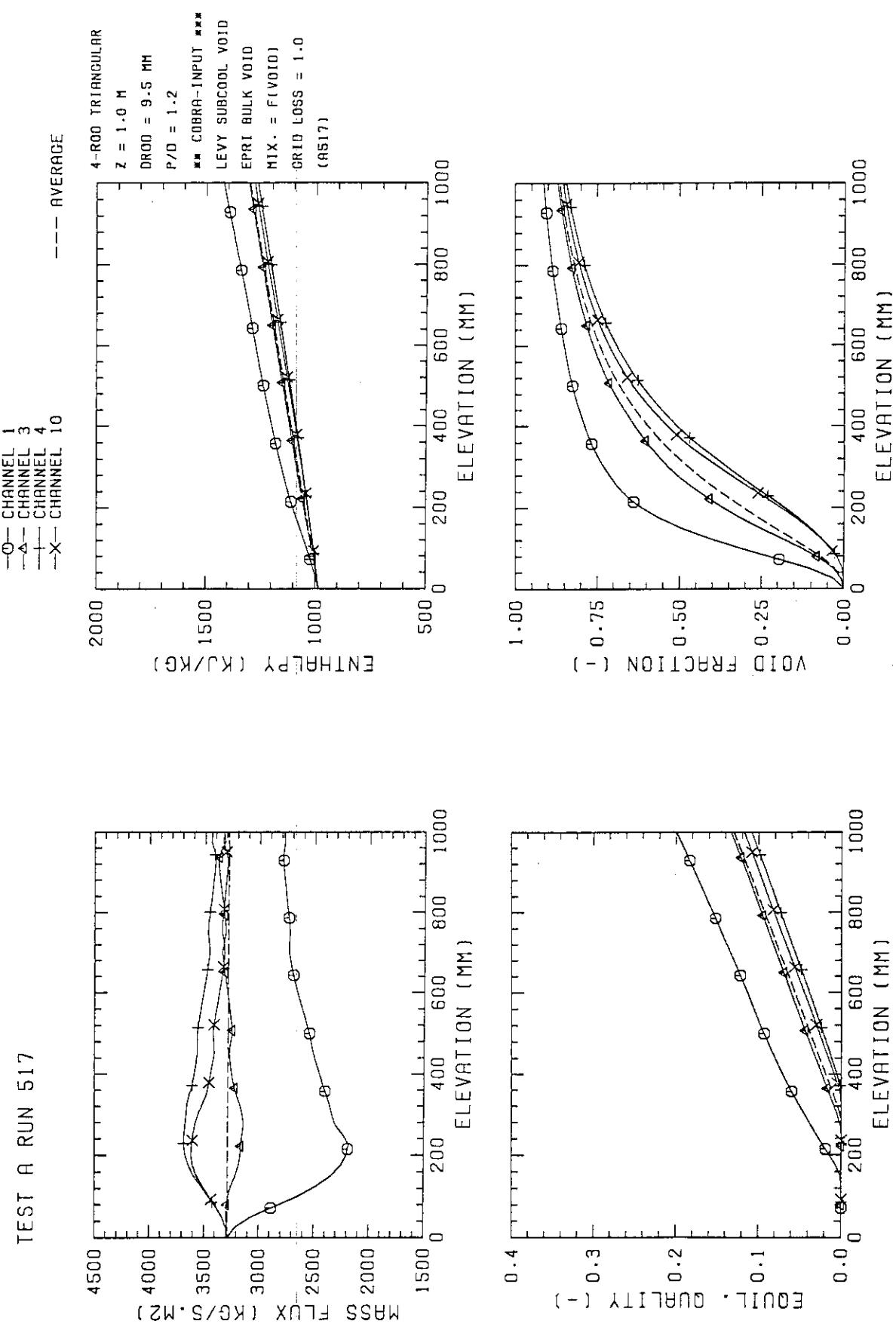
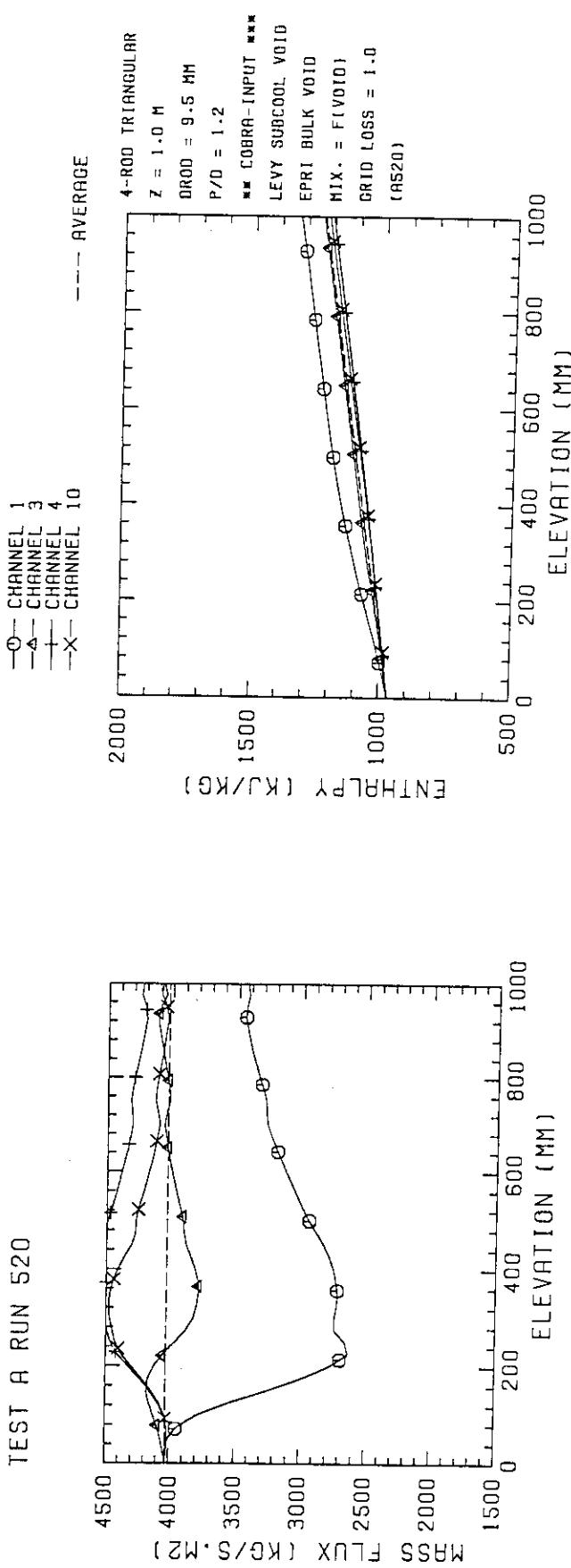


Fig. D.5 COBRA-IV-I analysis results (Run 517)

TEST A RUN 520



JAERI-M 90-044

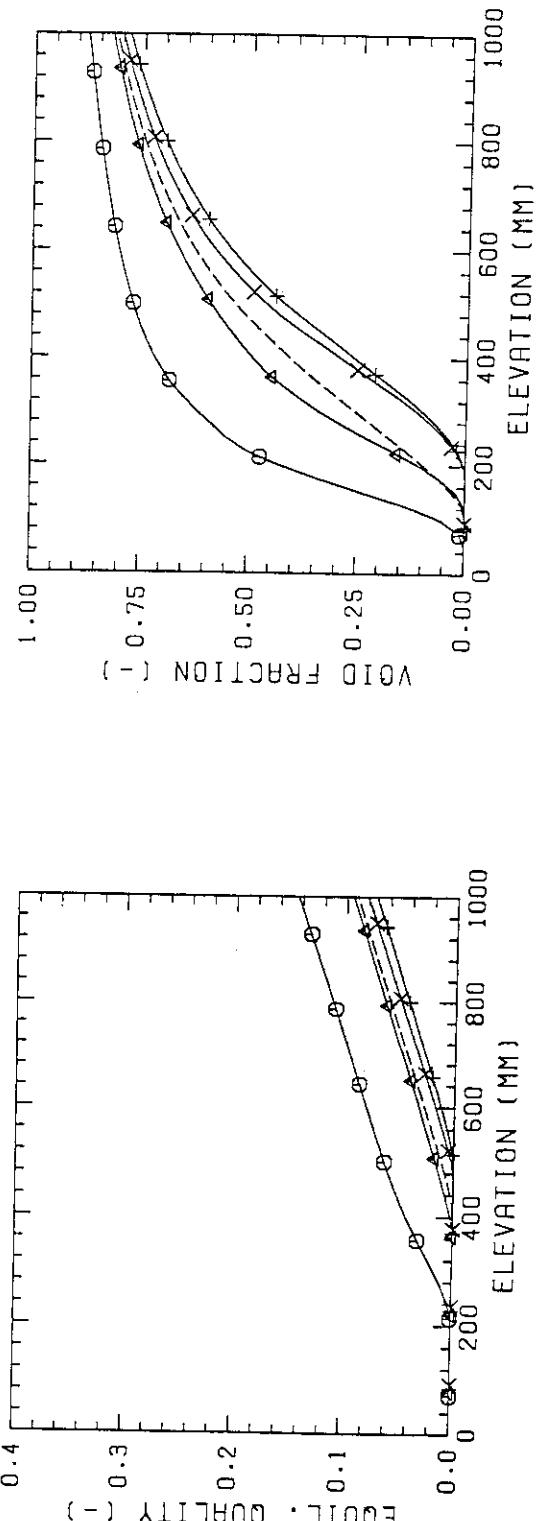


Fig. D.6 COBRA-IV-I analysis results (Run 520)

TEST A RUN 521

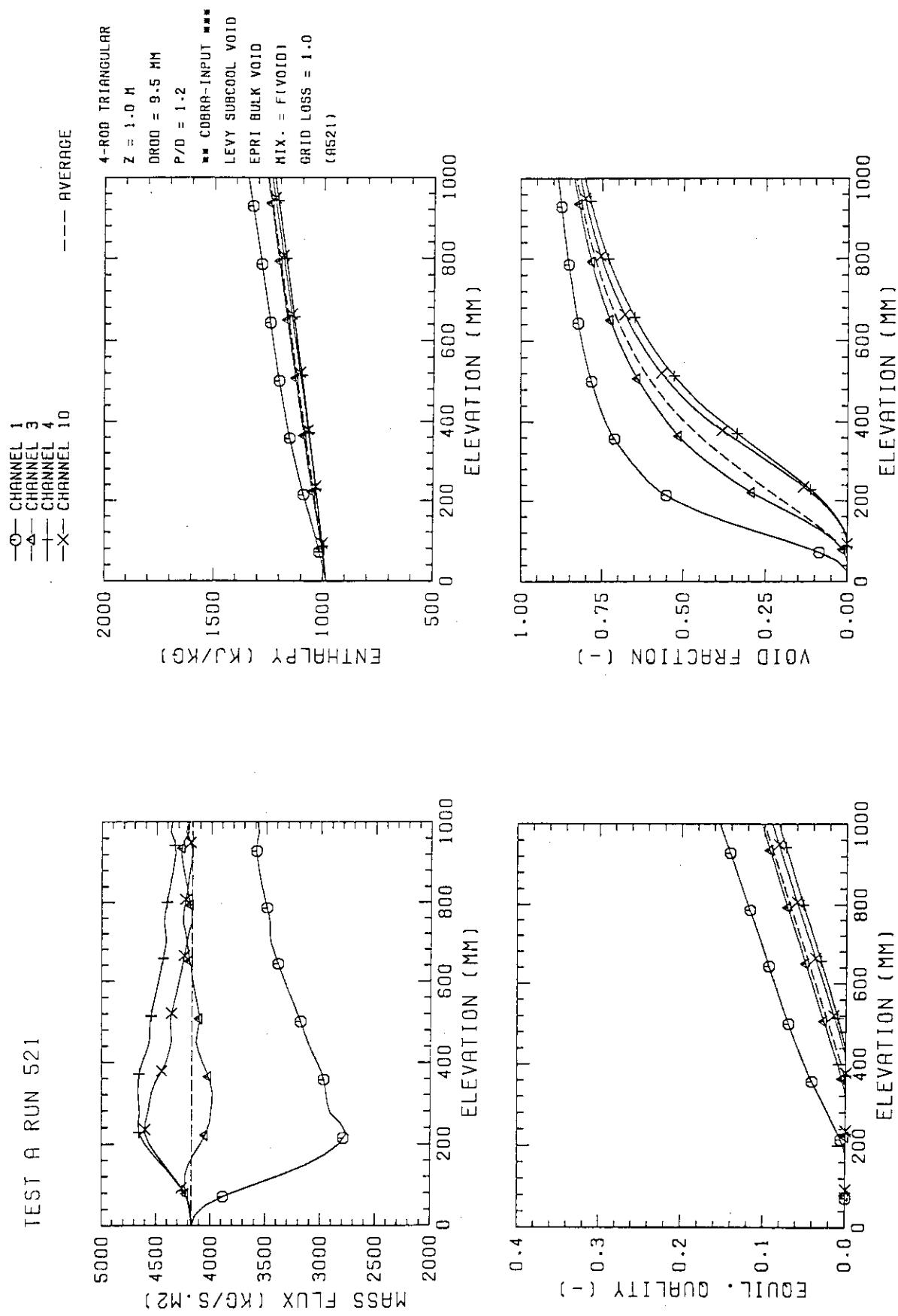


Fig. D.7 COBRA-IV-I analysis results (Run 521)

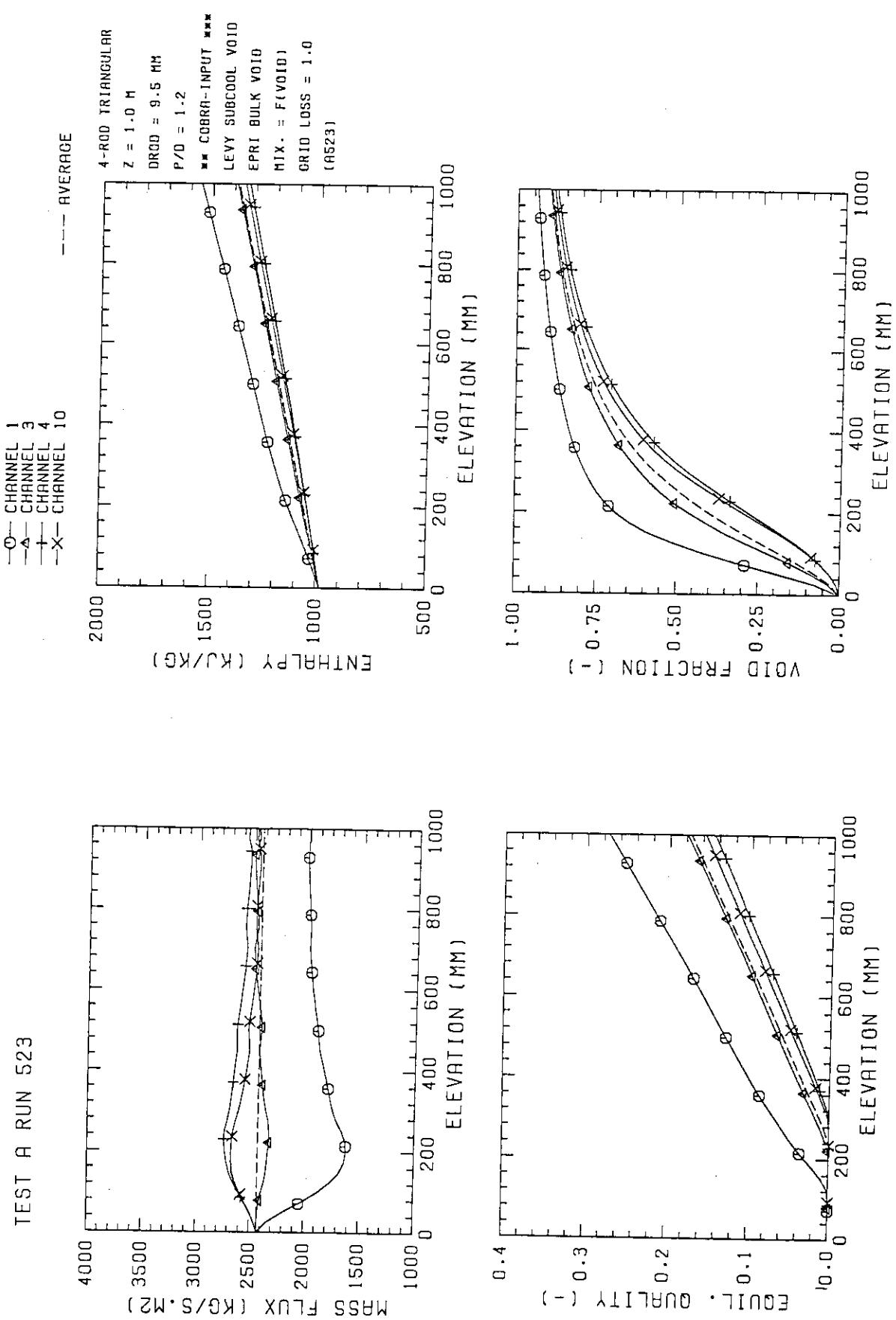


Fig. D.8 COBRA-IV-I analysis results (Run 523)

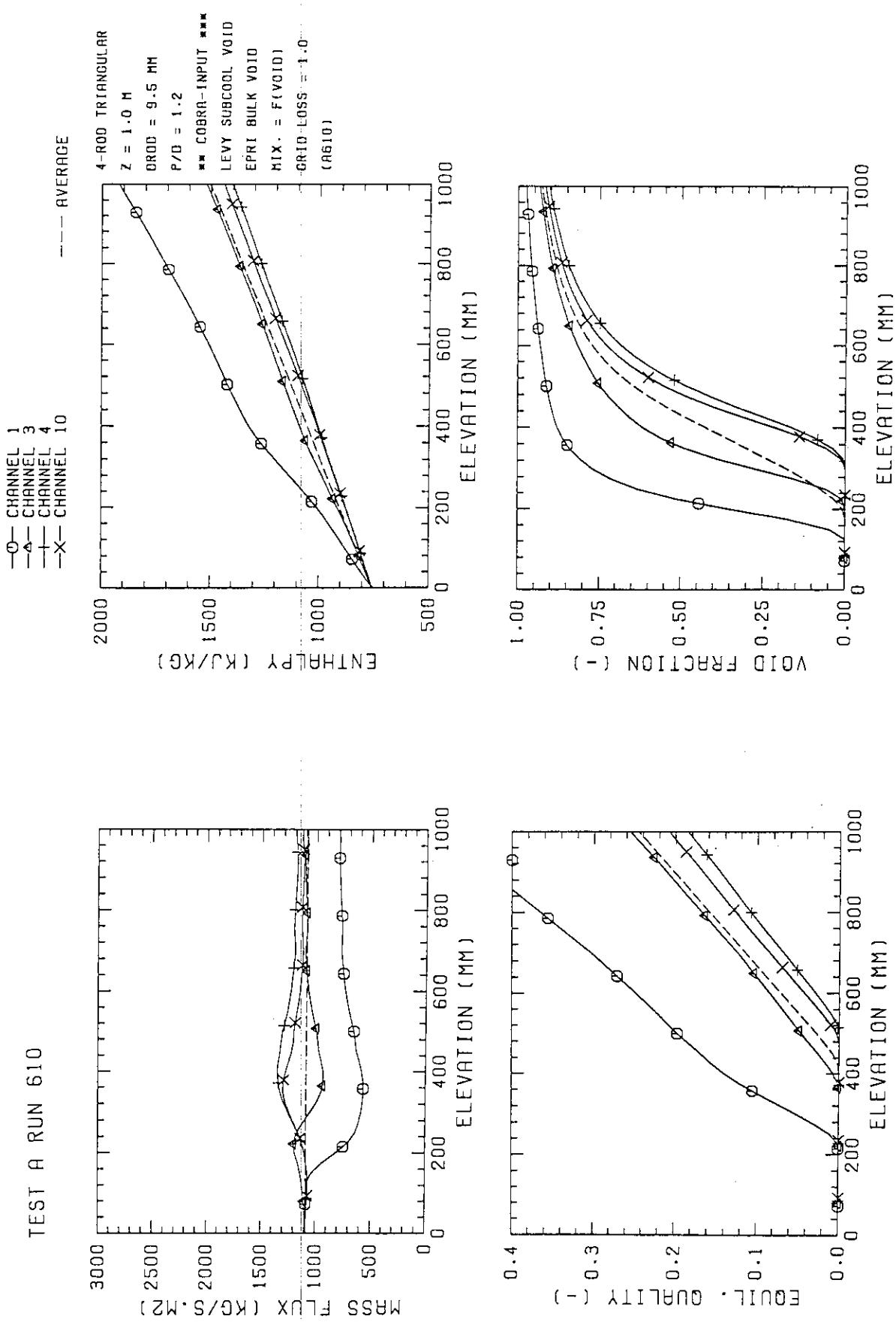
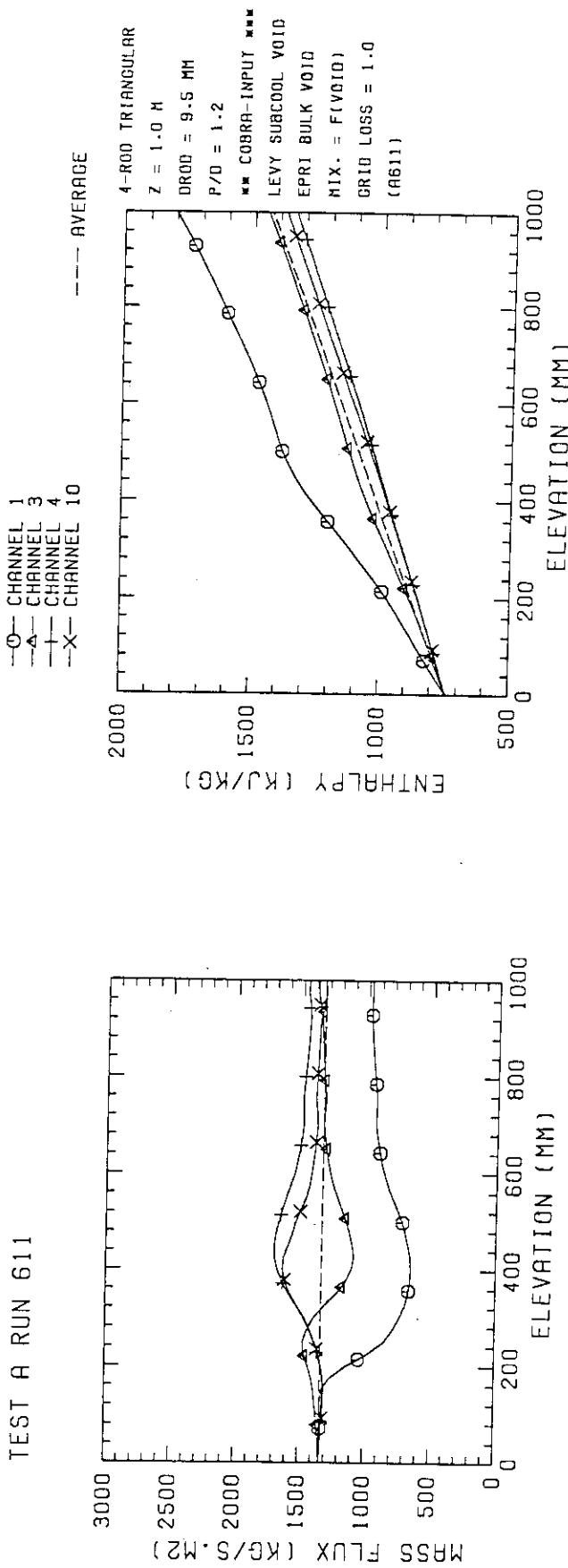


Fig. D.9 COBRA-IV-I analysis results (Run 610)

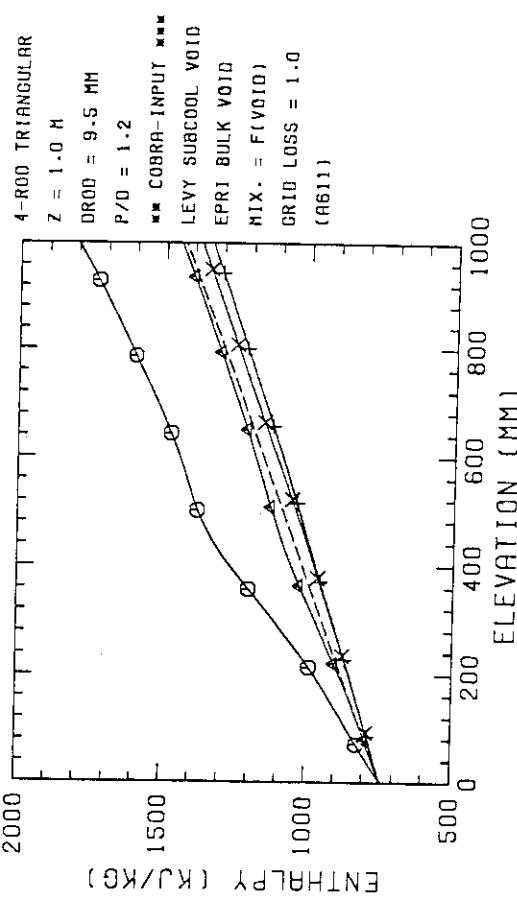
TEST A RUN 611



—○— CHANNEL 1
—△— CHANNEL 3
—+— CHANNEL 4
—×— CHANNEL 10

— — — AVERAGE

JAERI-M 90-044



4-ROD TRIANGULAR
 $Z = 1.0 \text{ M}$
DRDG = 9.5 MM
P/D = 1.2
■ ■ COBRA-INPUT ■ ■
LEYV SUBCOOL VOID
EFRI BULK VOID
MIX. = F(VOID)
GRID LOSS = 1.0
(A611)

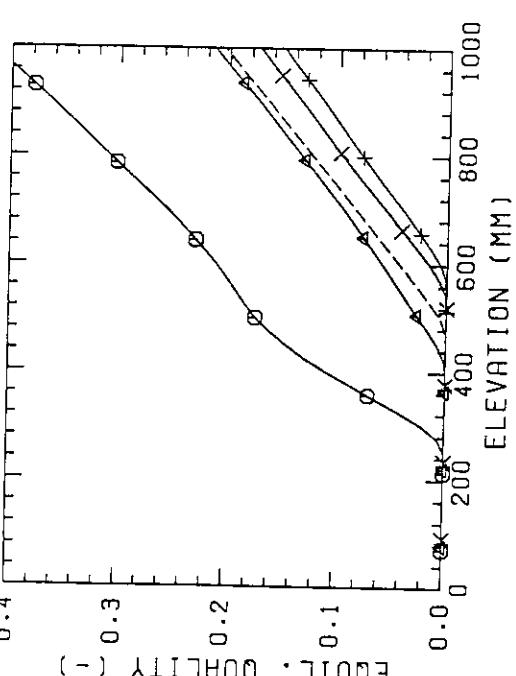
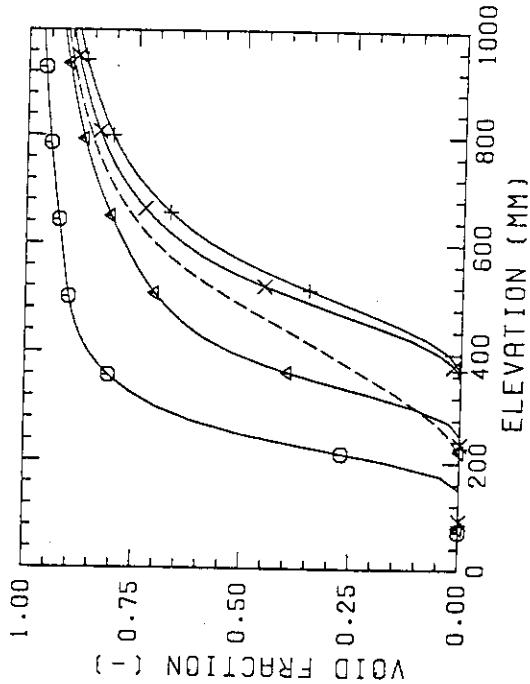


Fig. D.10 COBRA-IV-I analysis results (Run 611)

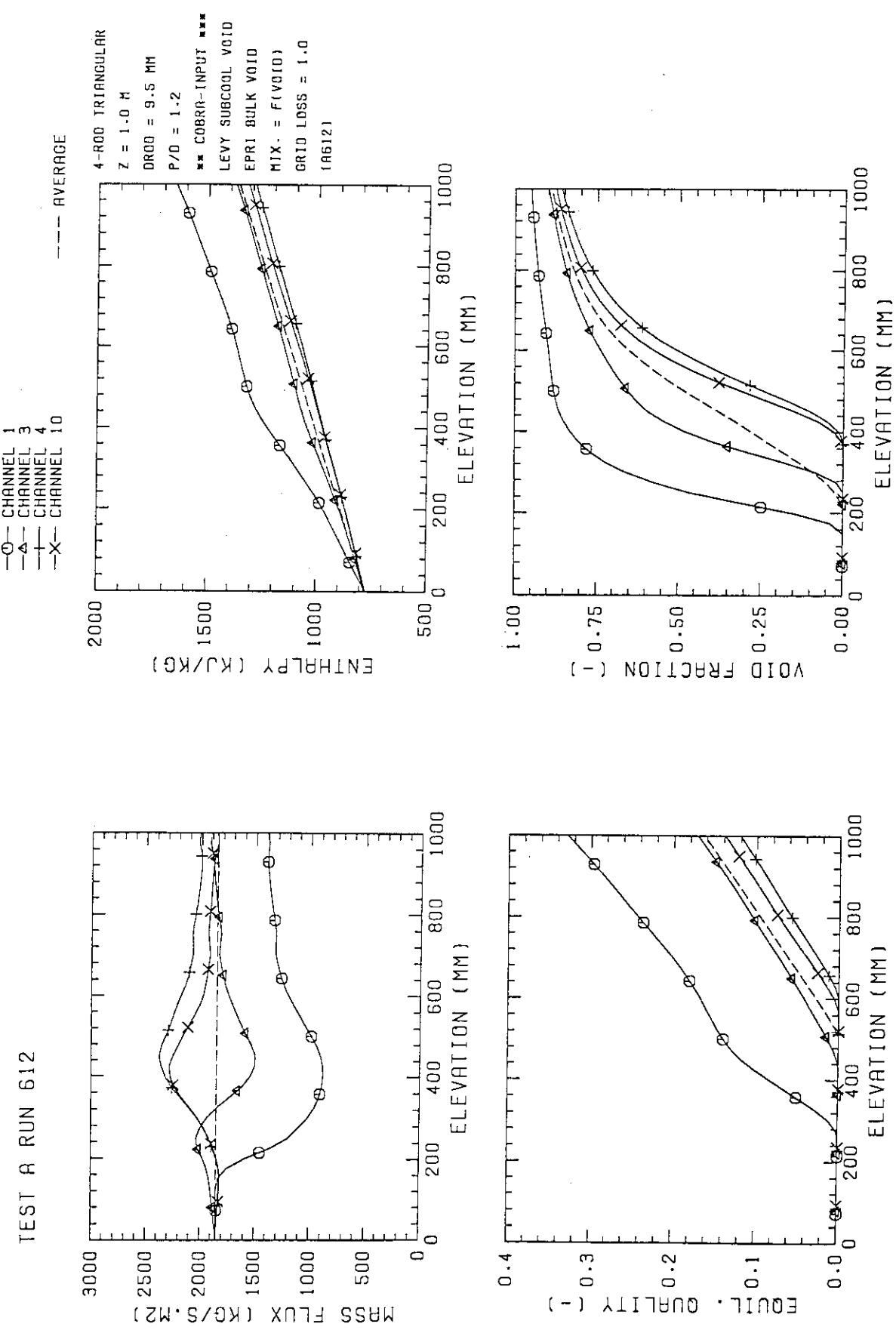


Fig. D.11 COBRA-IV-I analysis results (Run 612)

TEST A RUN 616

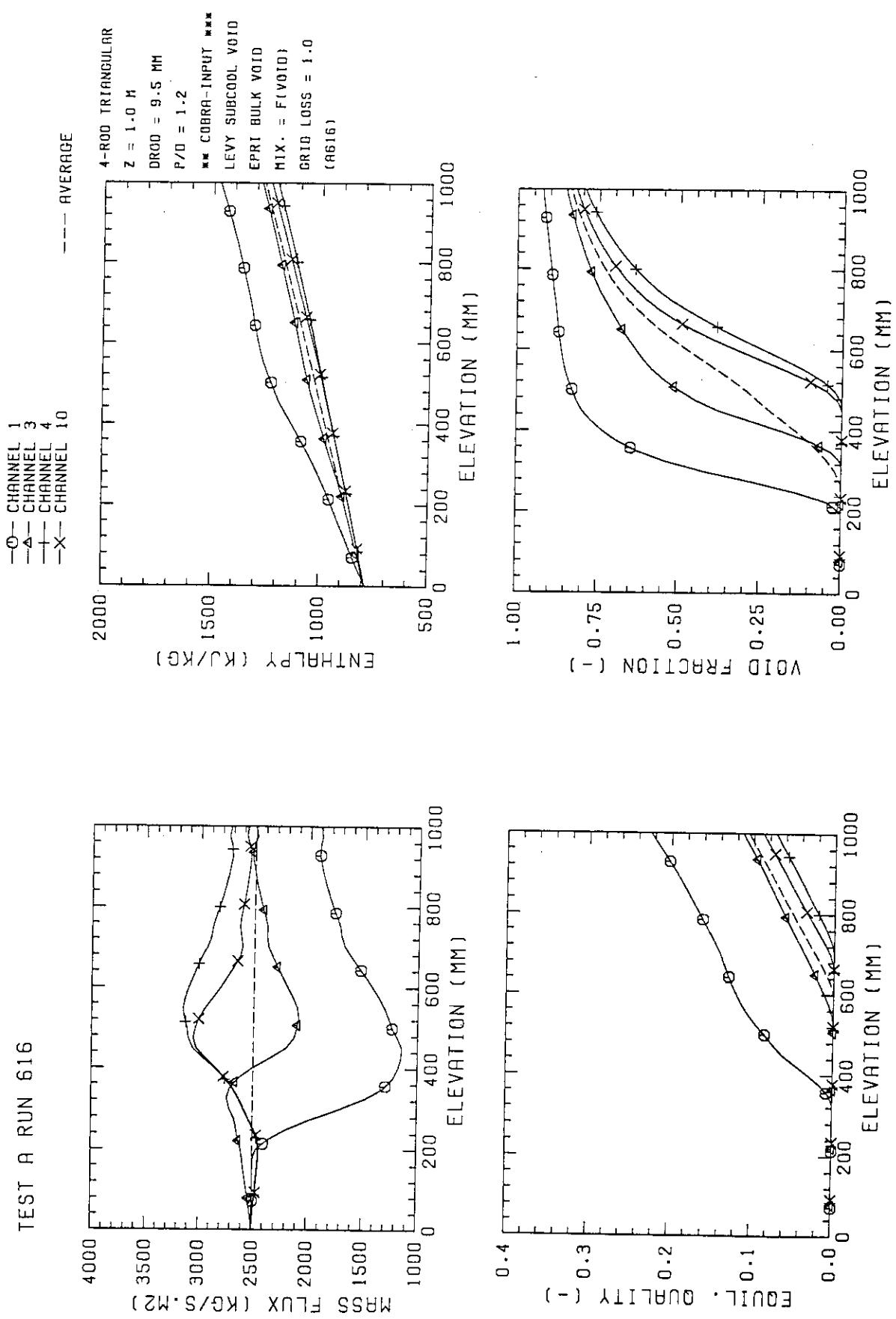


Fig. D.12 COBRA-IV-I analysis results (Run 616)

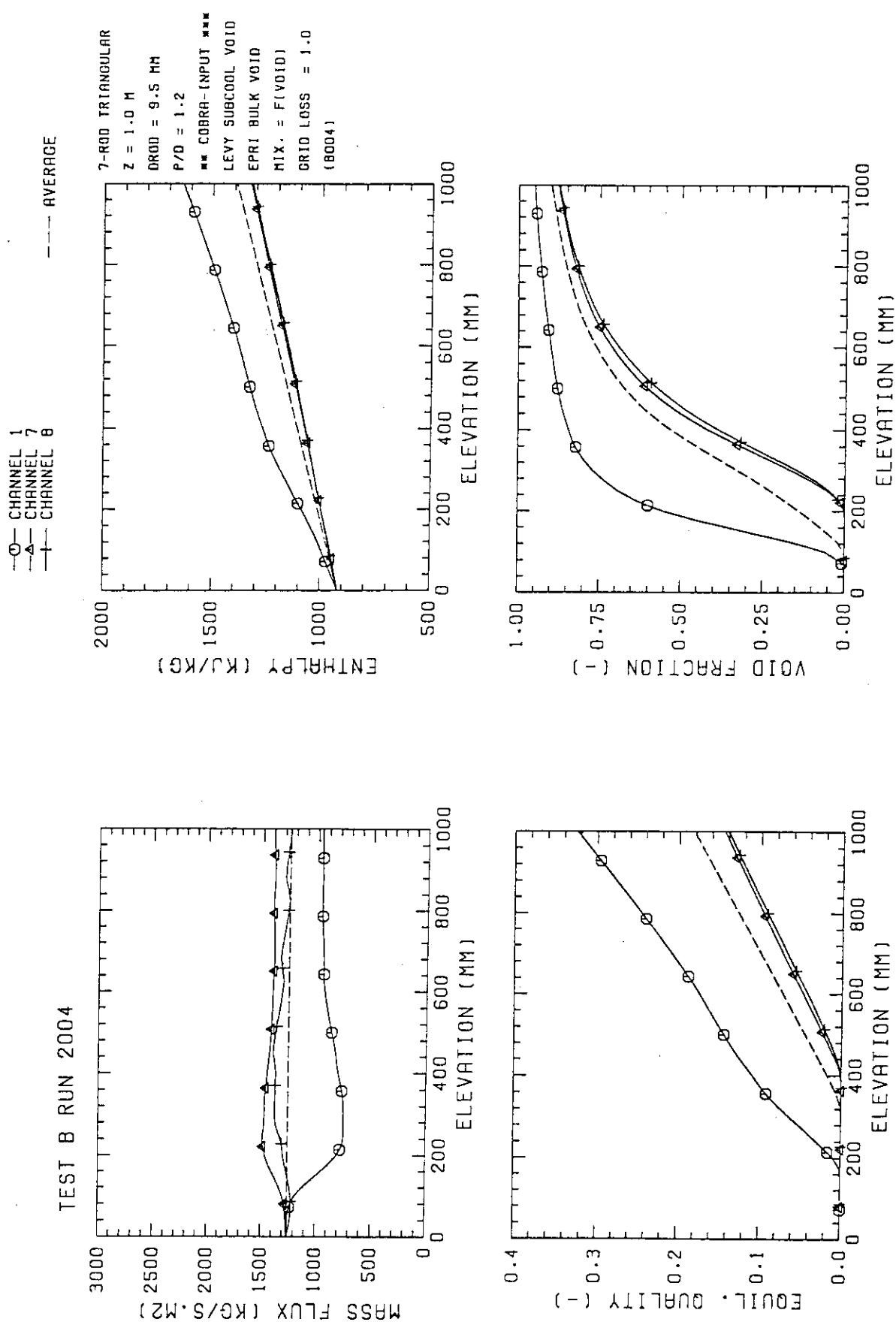


Fig. D.13 COBRA-IV-I analysis results (Run 2004)

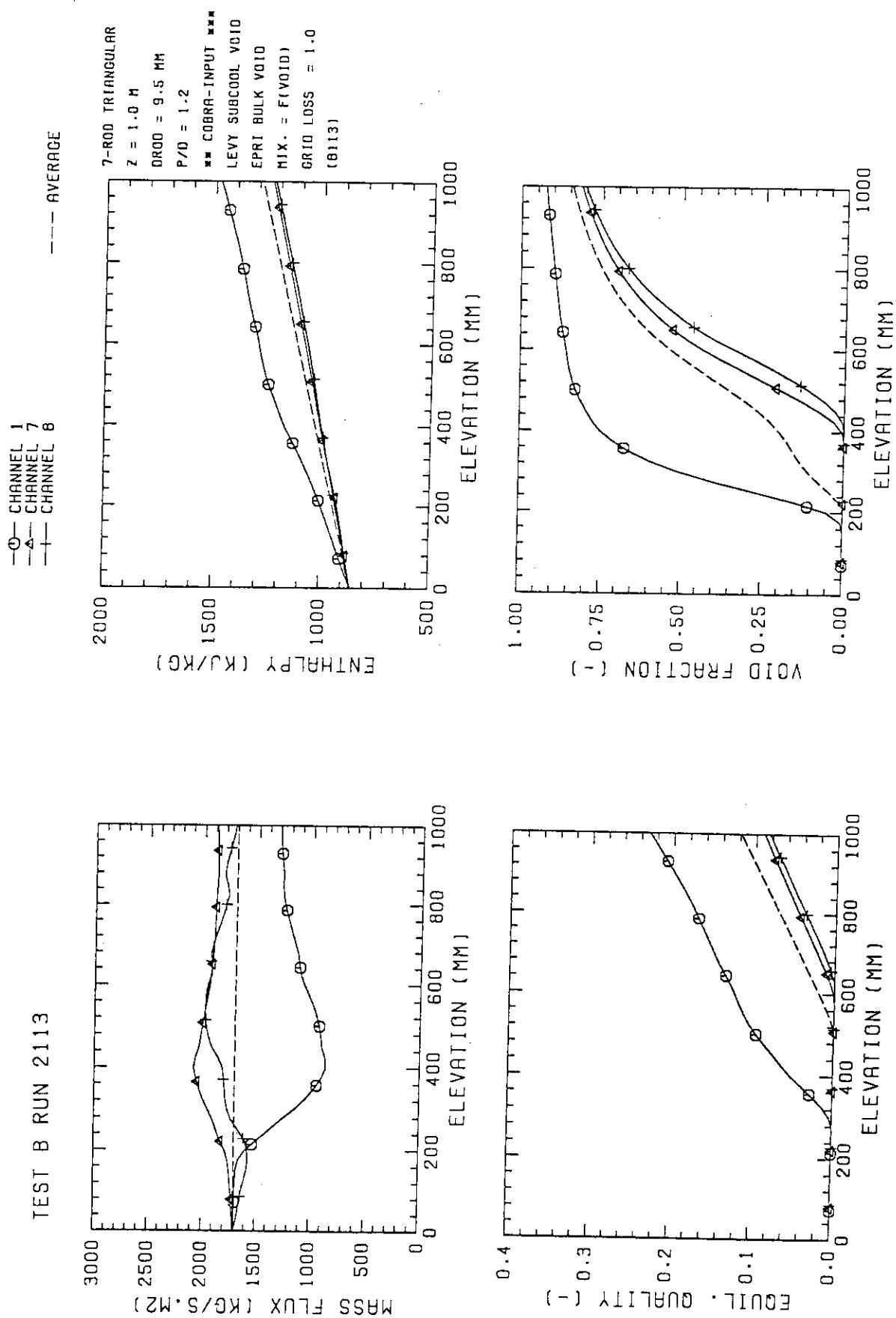


Fig. D.14 COBRA-IV-I analysis results (Run 2113)

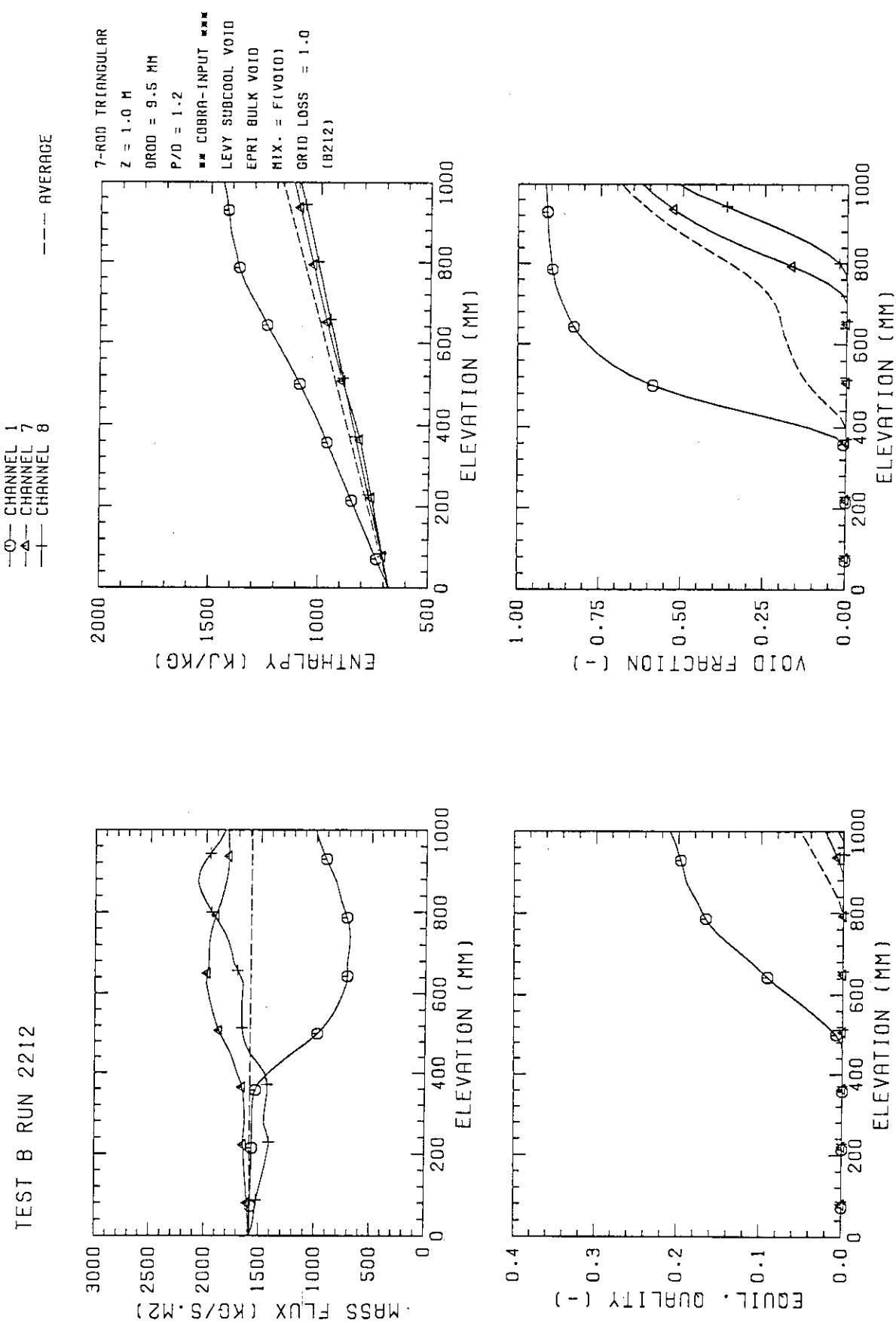


Fig. D.15 COBRA-IV-I analysis results (Run 2212)

TEST B RUN 2310

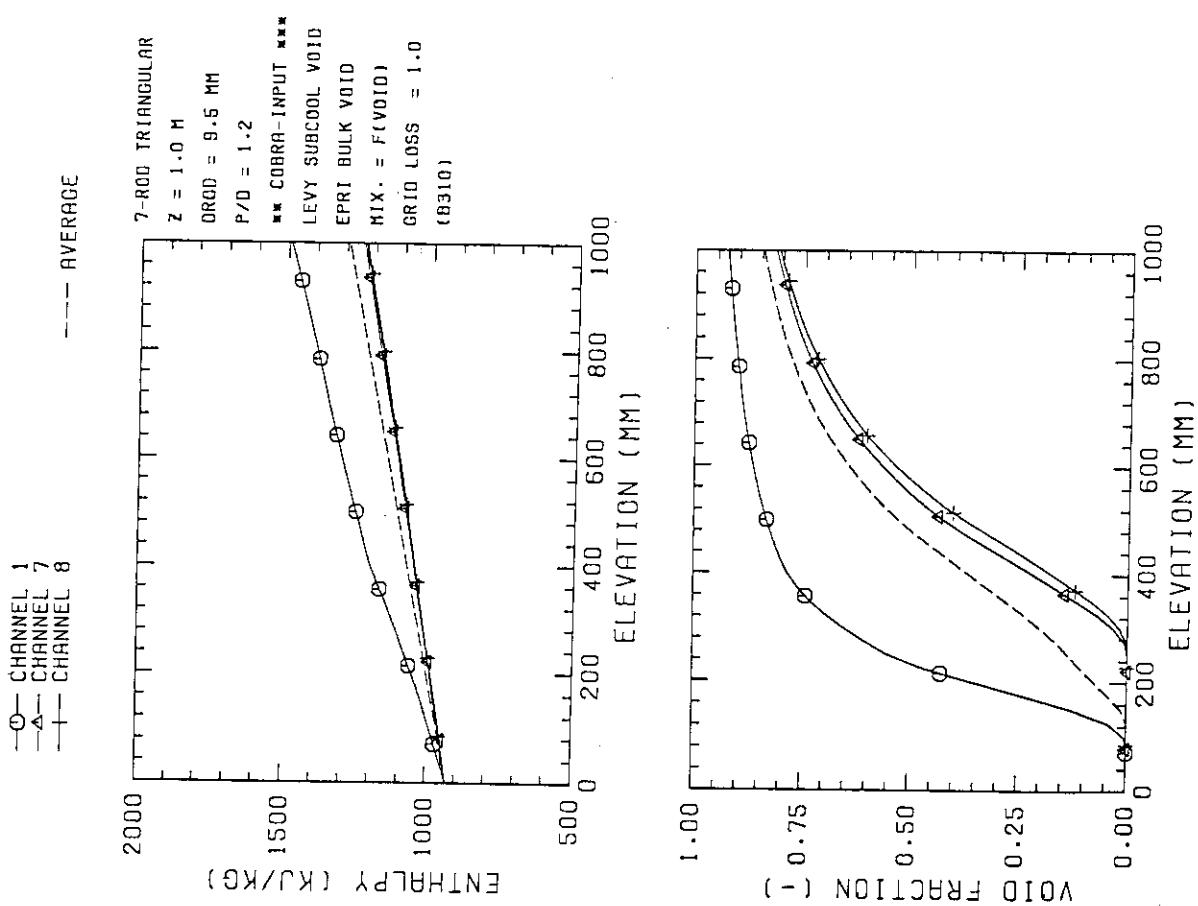
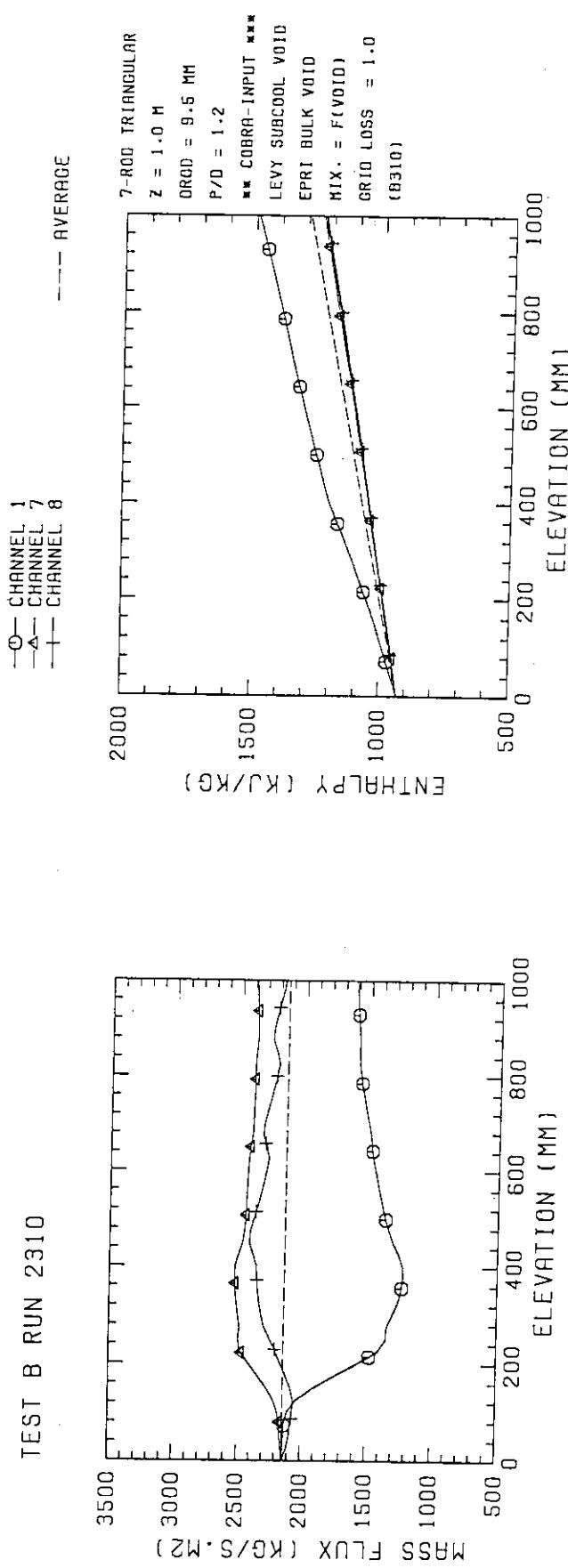


Fig. D.16 COBRA-IV-I analysis results (Run 2310)

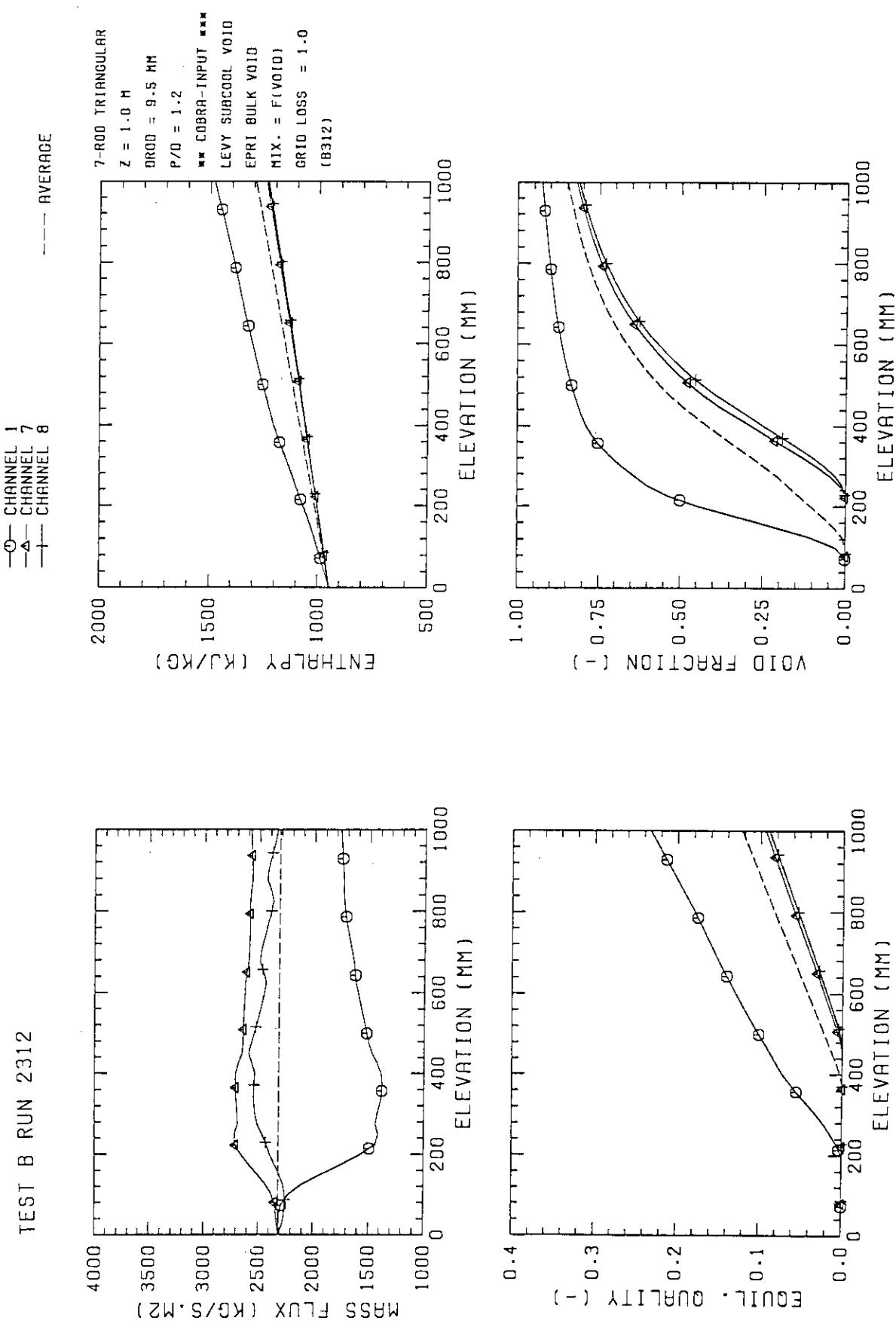
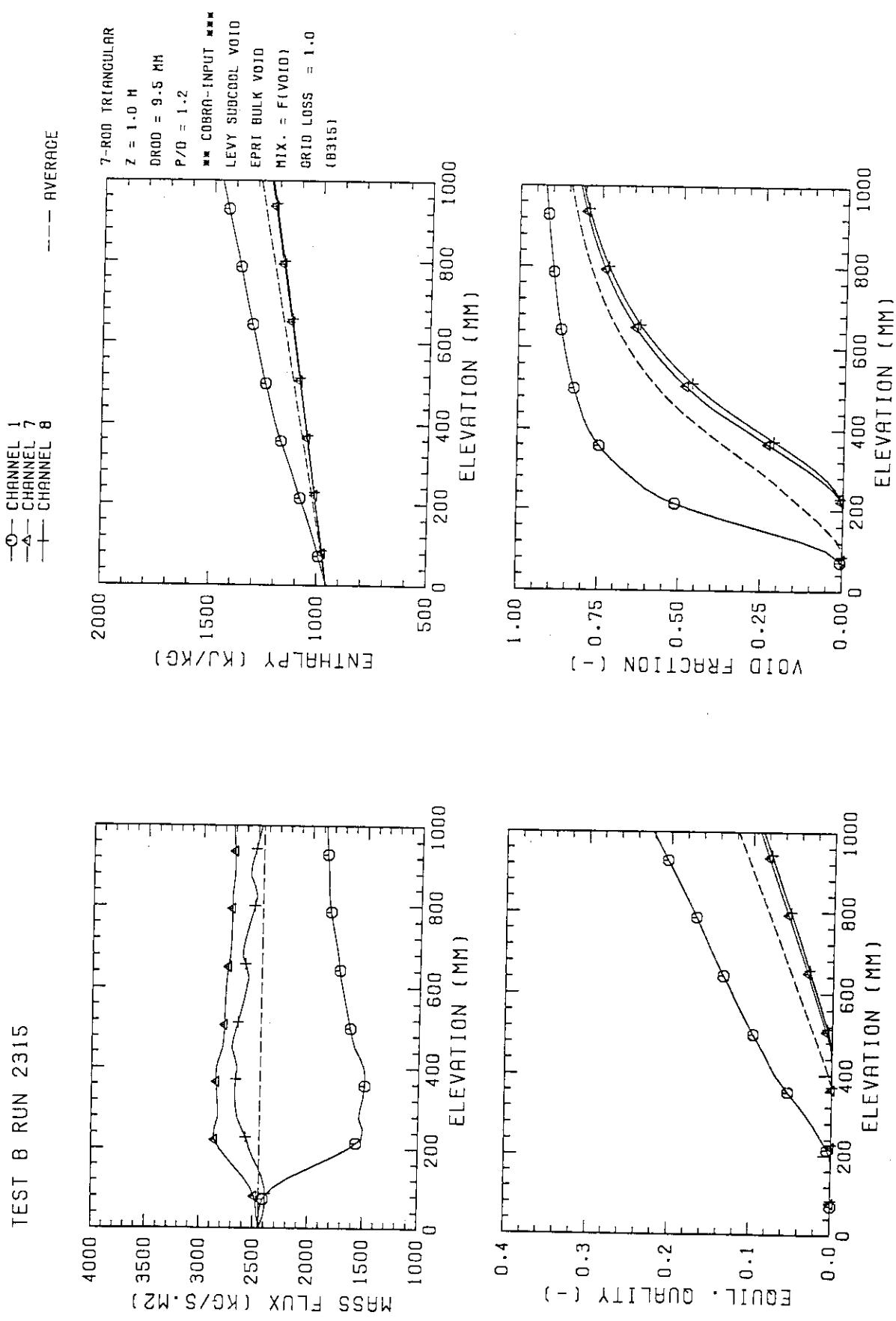


Fig. D.17 COBRA-IV-I analysis results (Run 2312)

TEST B RUN 2315



JAERI-M 90-044

Fig. D.18 COBRA-IV-I analysis results (Run 2315)

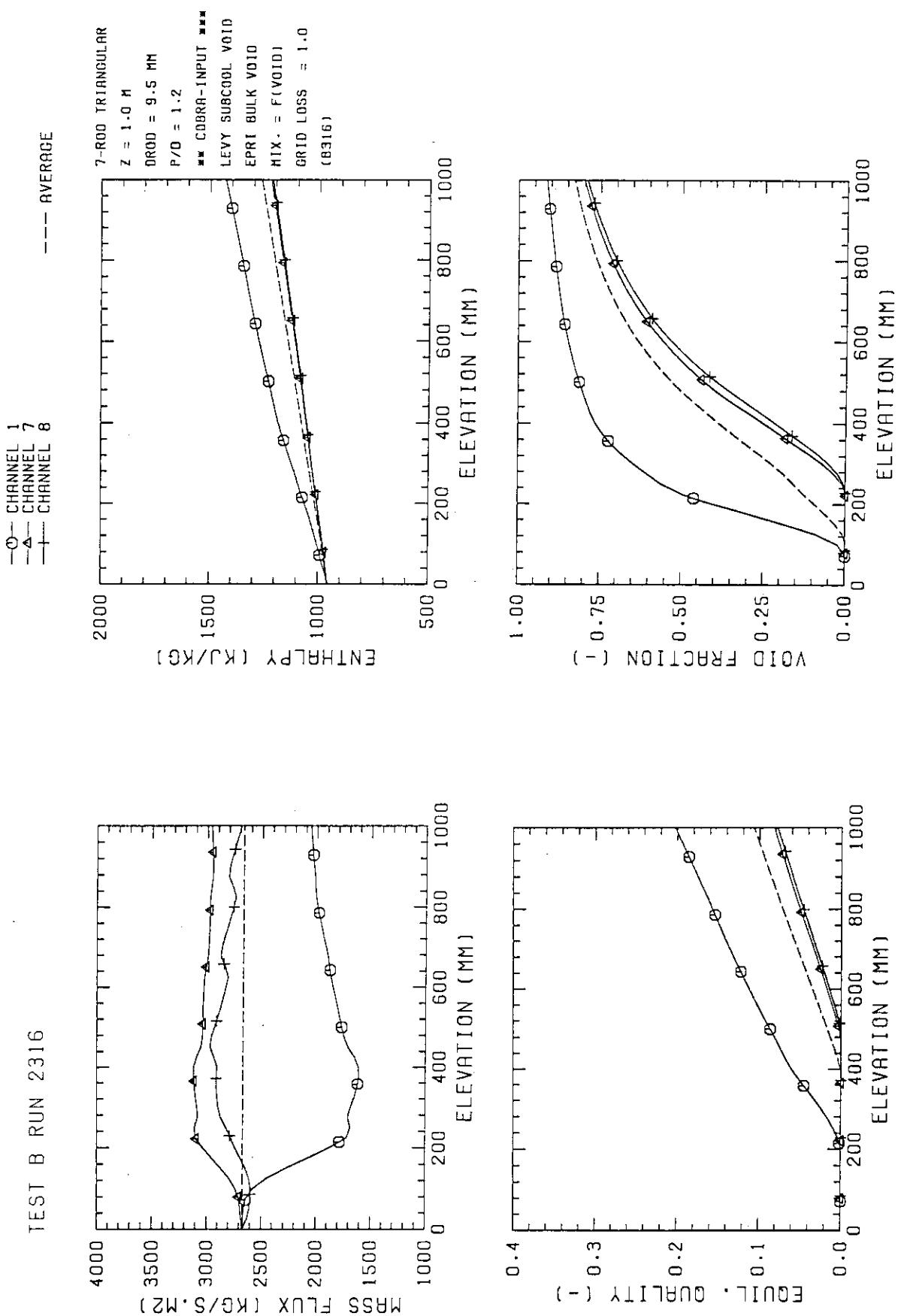
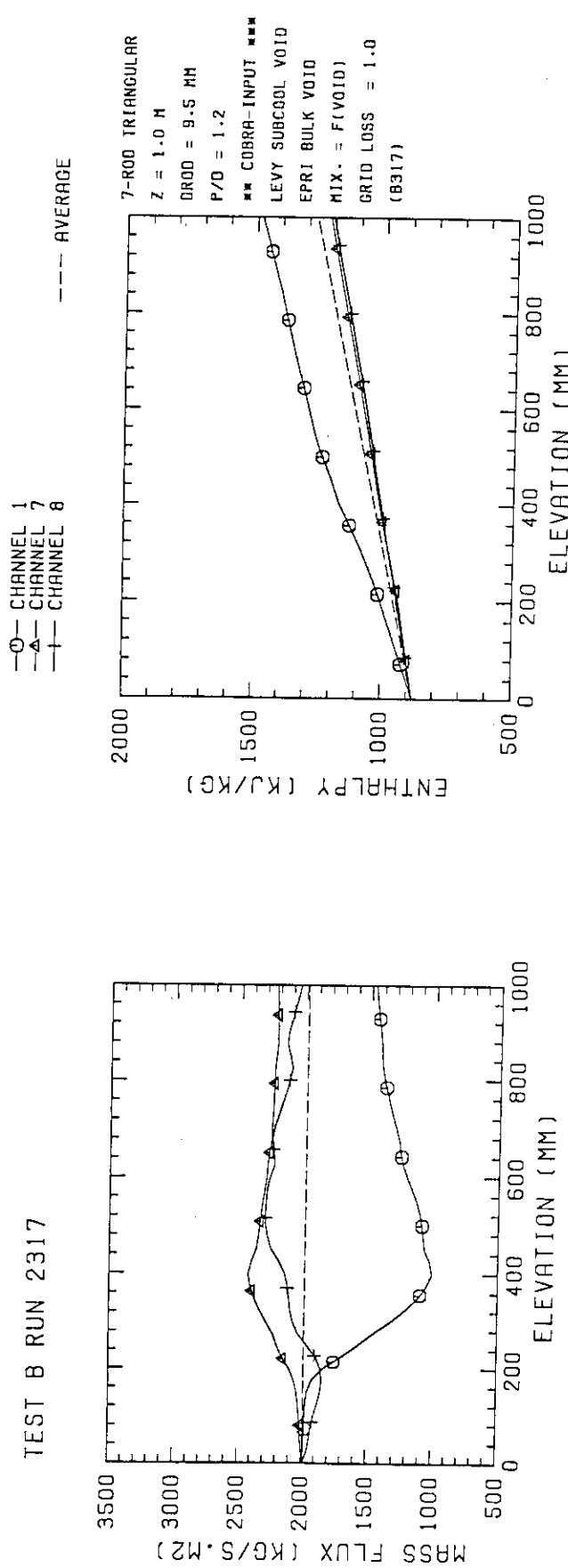


Fig. D.19 COBRA-IV-I analysis results (Run 2316)

TEST B RUN 2317



JAERI-M 90-044

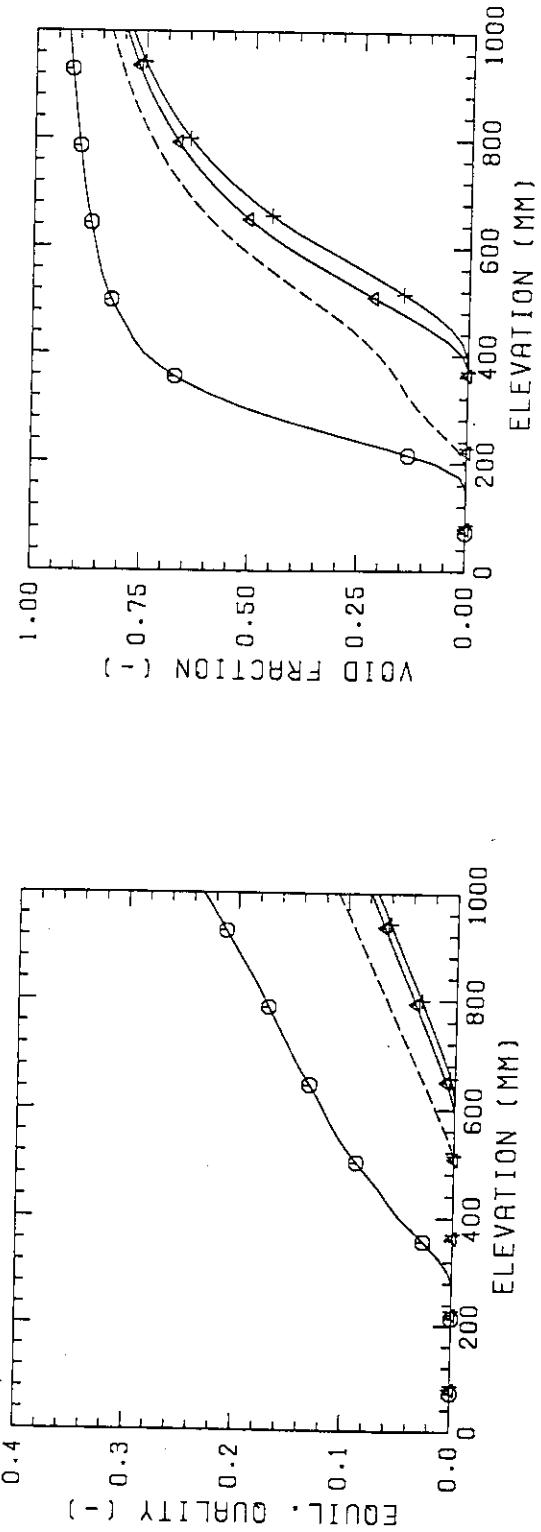
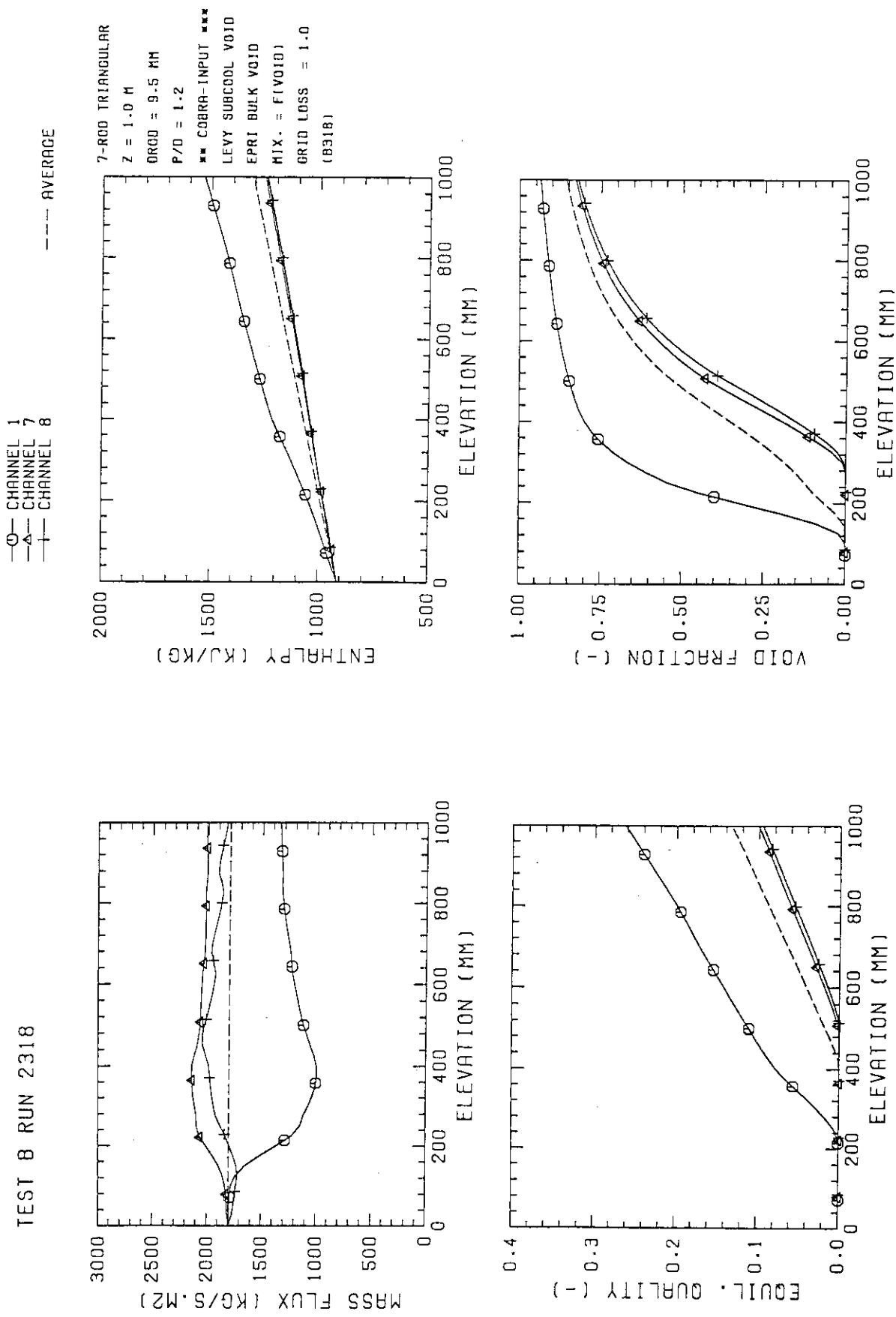


Fig. D.20 COBRA-IV-I analysis results (Run 2317)

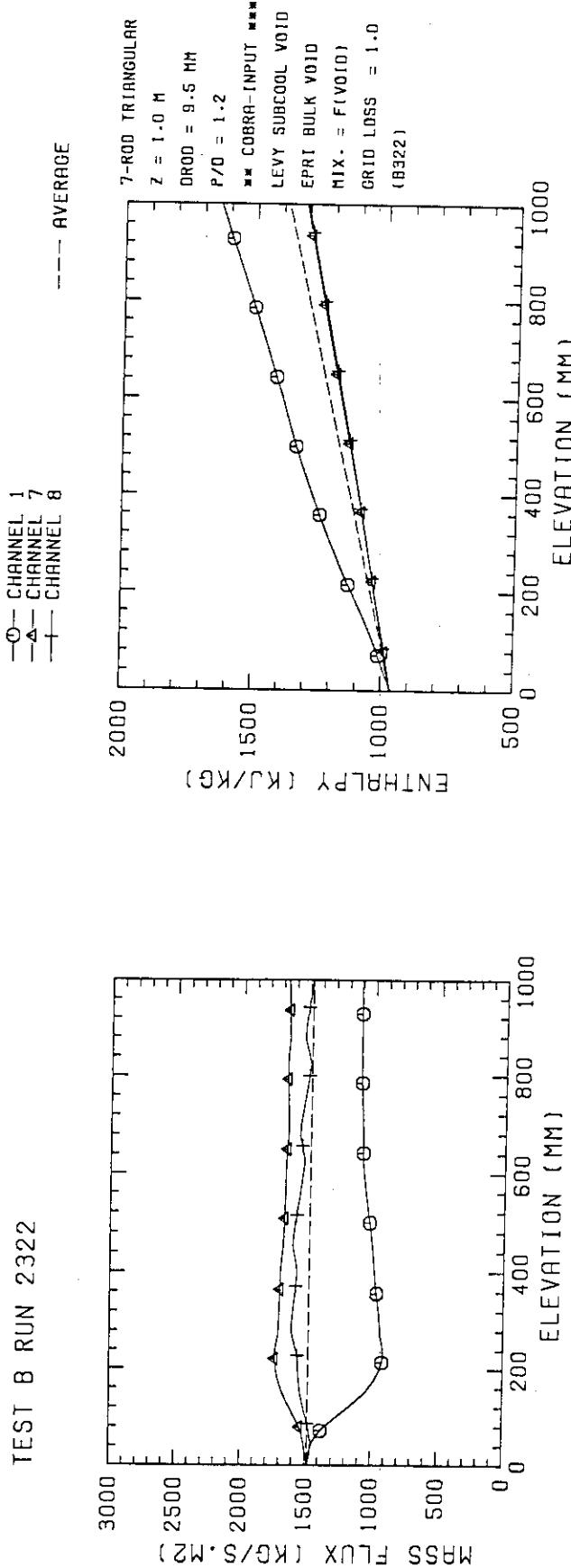
TEST B RUN 2318



JAERI-M 90-044

Fig. D.21 COBRA-IV-I analysis results (Run 2318)

TEST B RUN 2322



JAERI-M 90-044

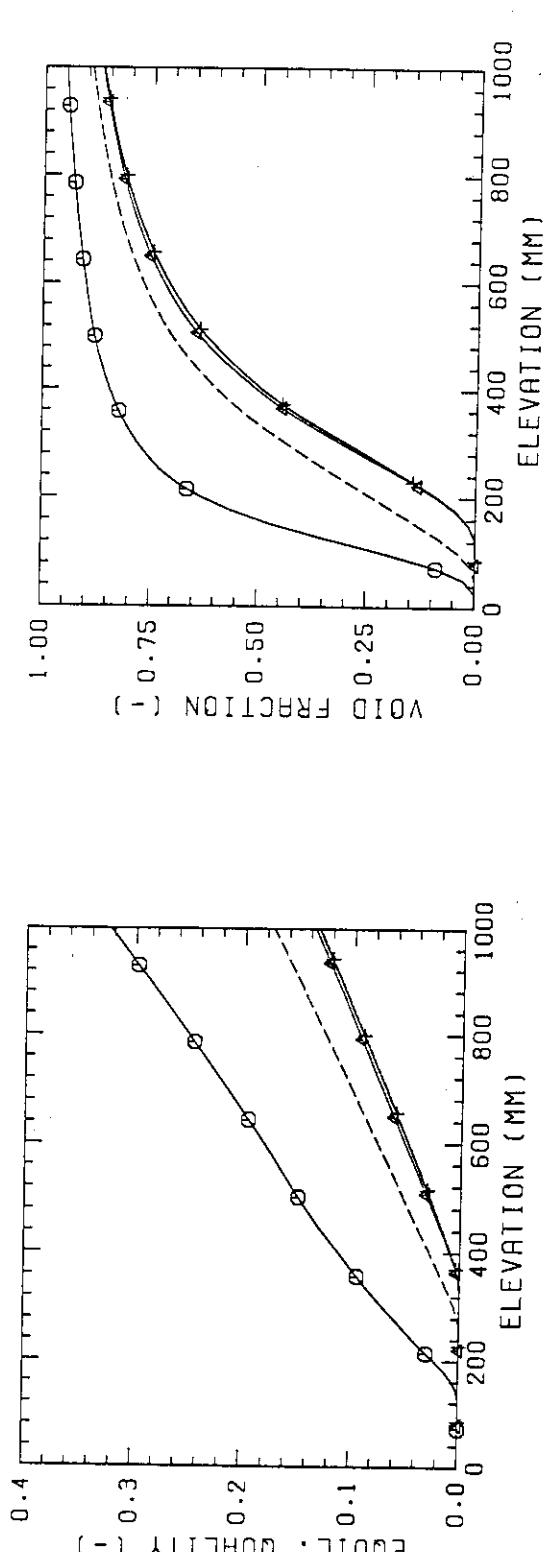


Fig. D.22 COBRA-IV-I analysis results (Run 2322)

TEST B RUN 2323

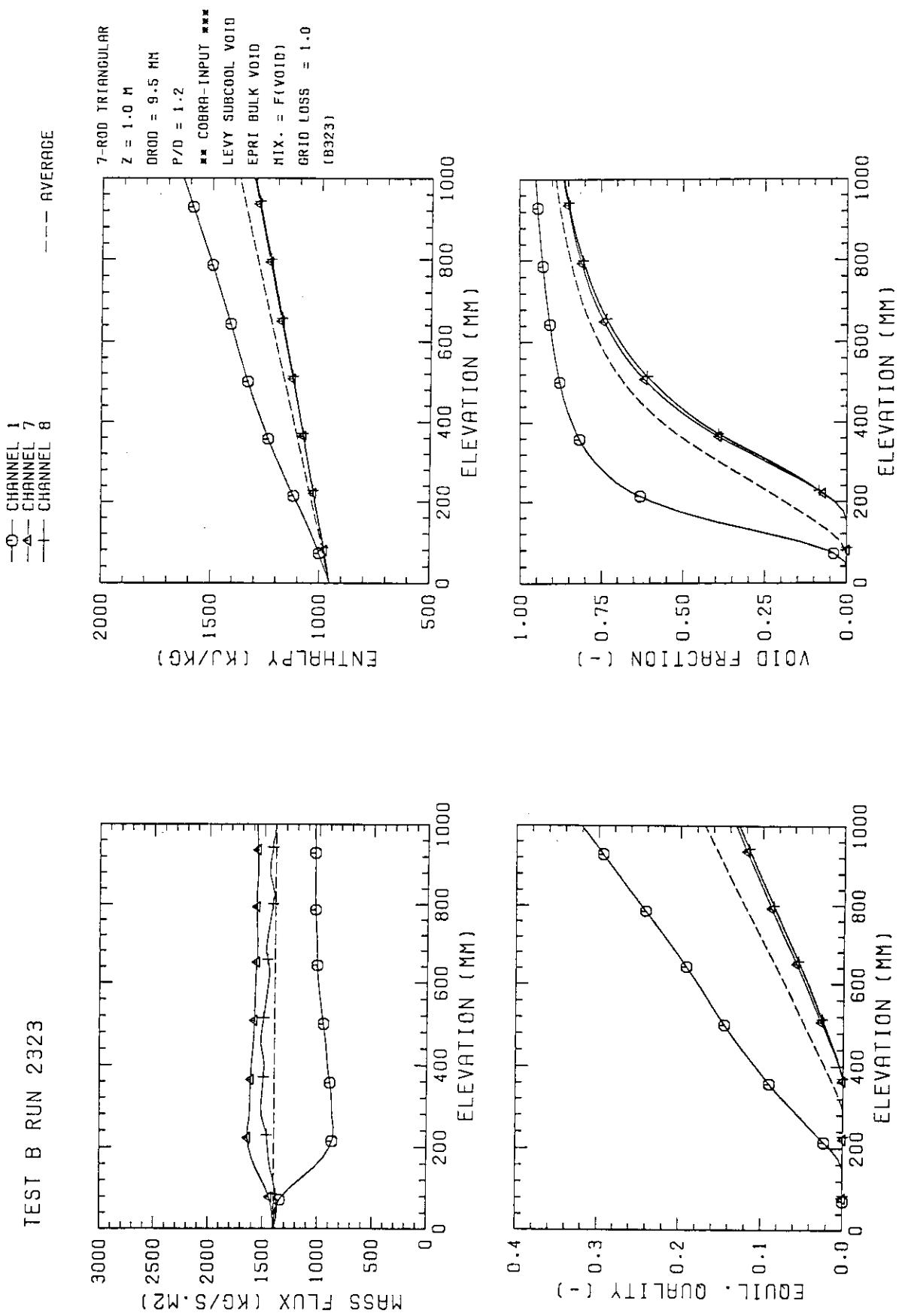
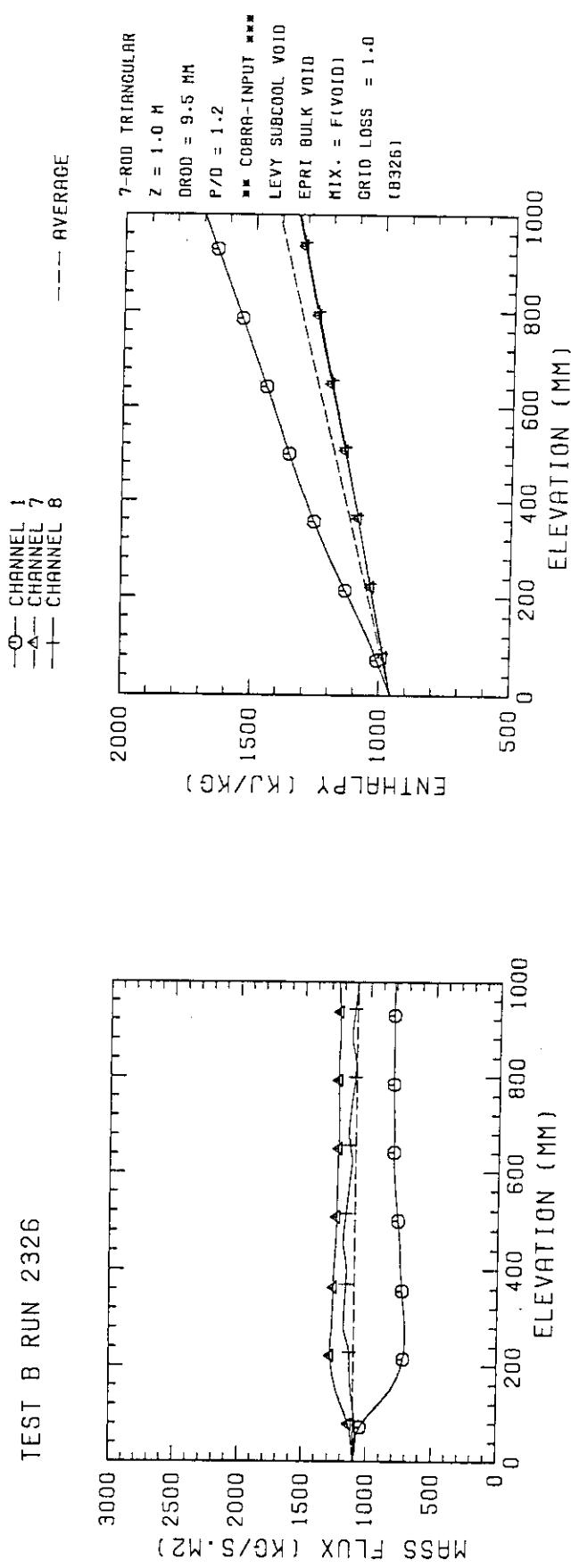


Fig. D.23 COBRA-IV-I analysis results (Run 2323)

TEST B RUN 2326



JAERI-M 90-044

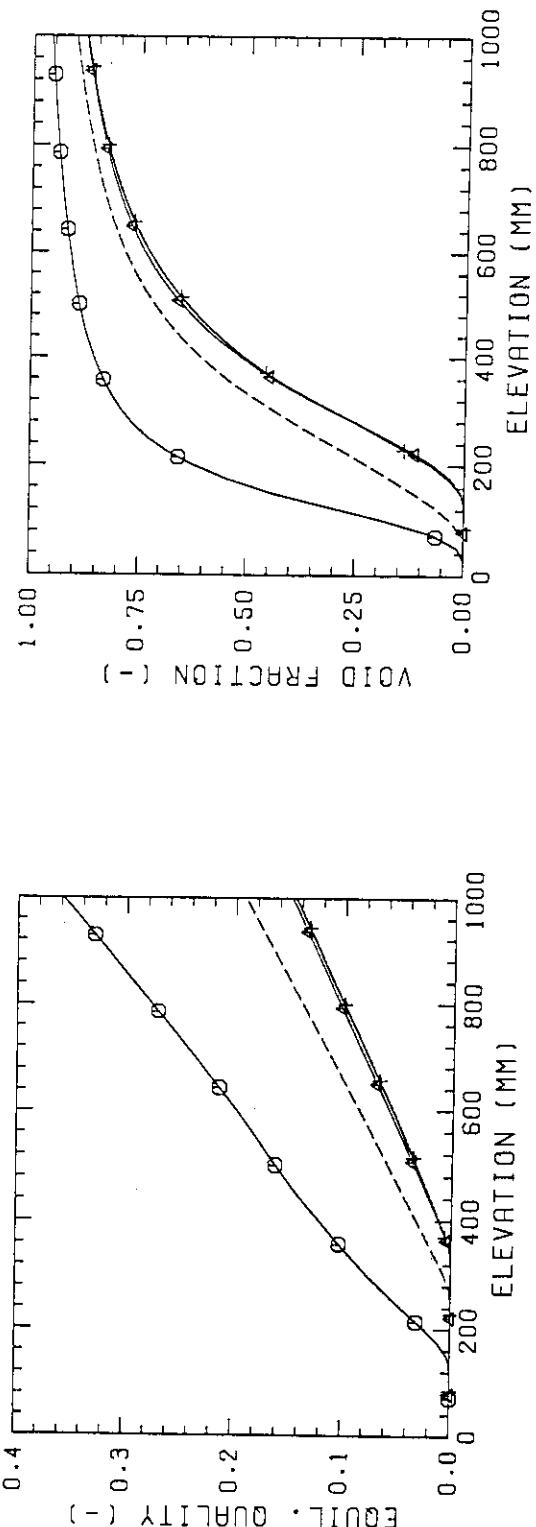


Fig. D.24 COBRA-IV-I analysis results (Run 2326)

TEST C RUN 3313

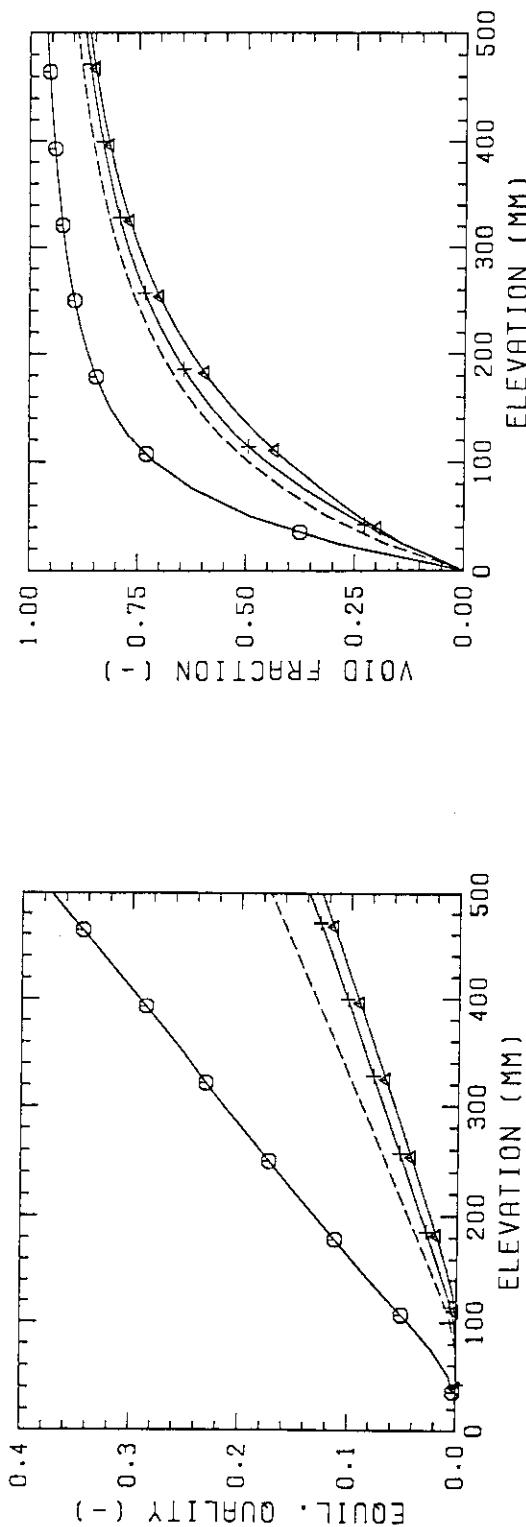
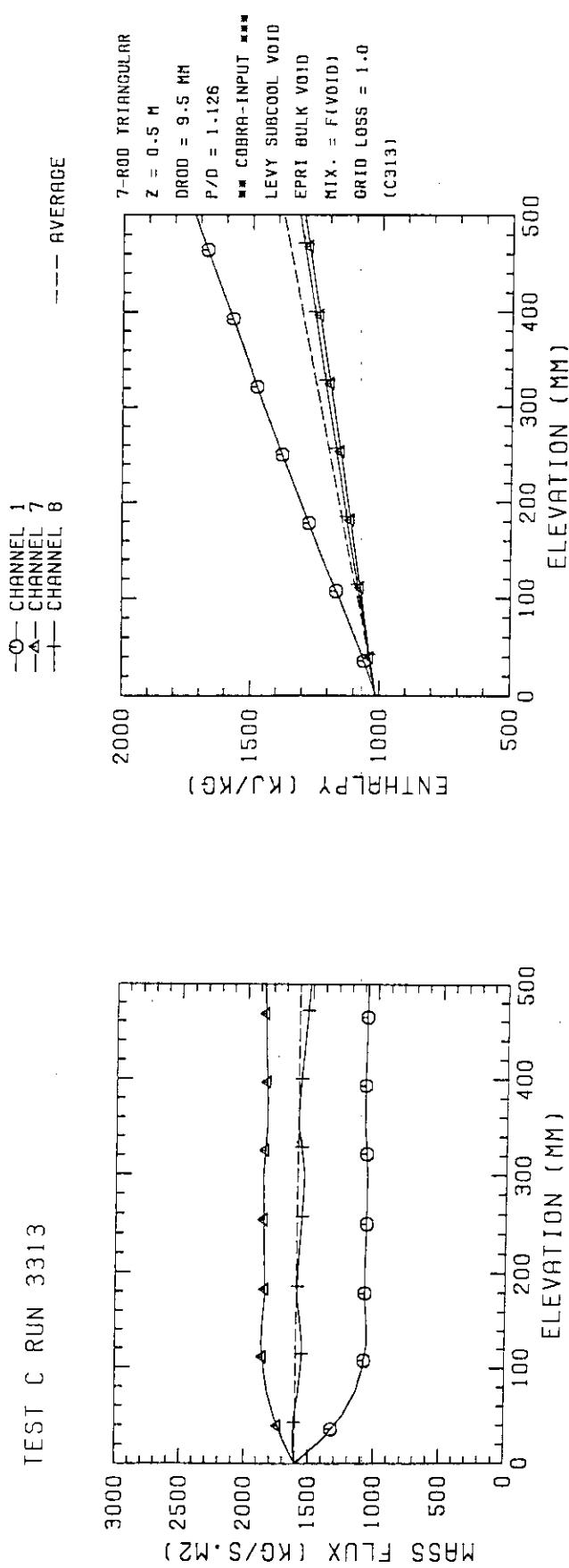
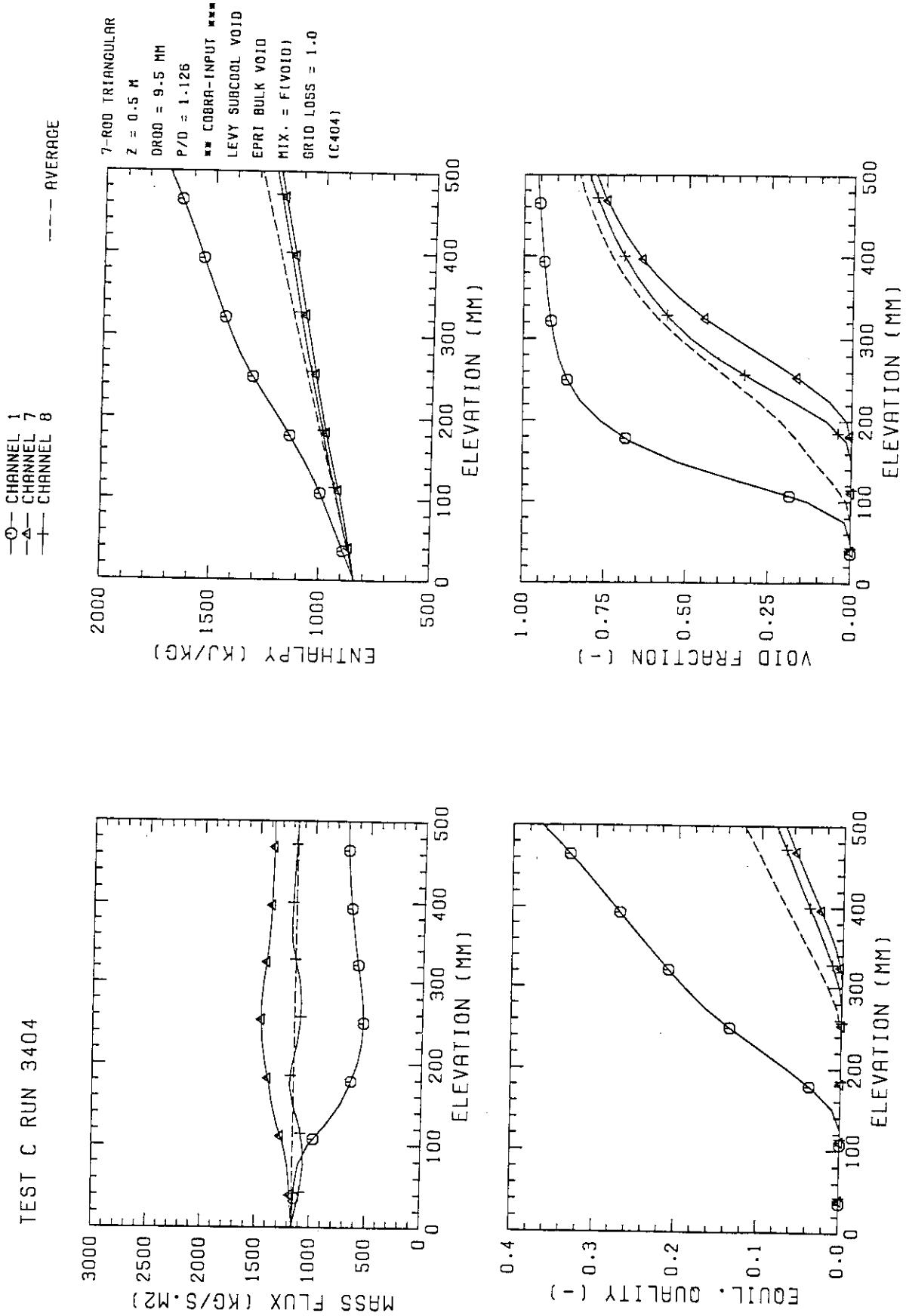


Fig. D.25 COBRA-IV-I analysis results (Run 3313)

TEST C RUN 3404



JAERI-M 90-044

Fig. D.26 COBRA-IV-I analysis results (Run 3404)

TEST C RUN 3407

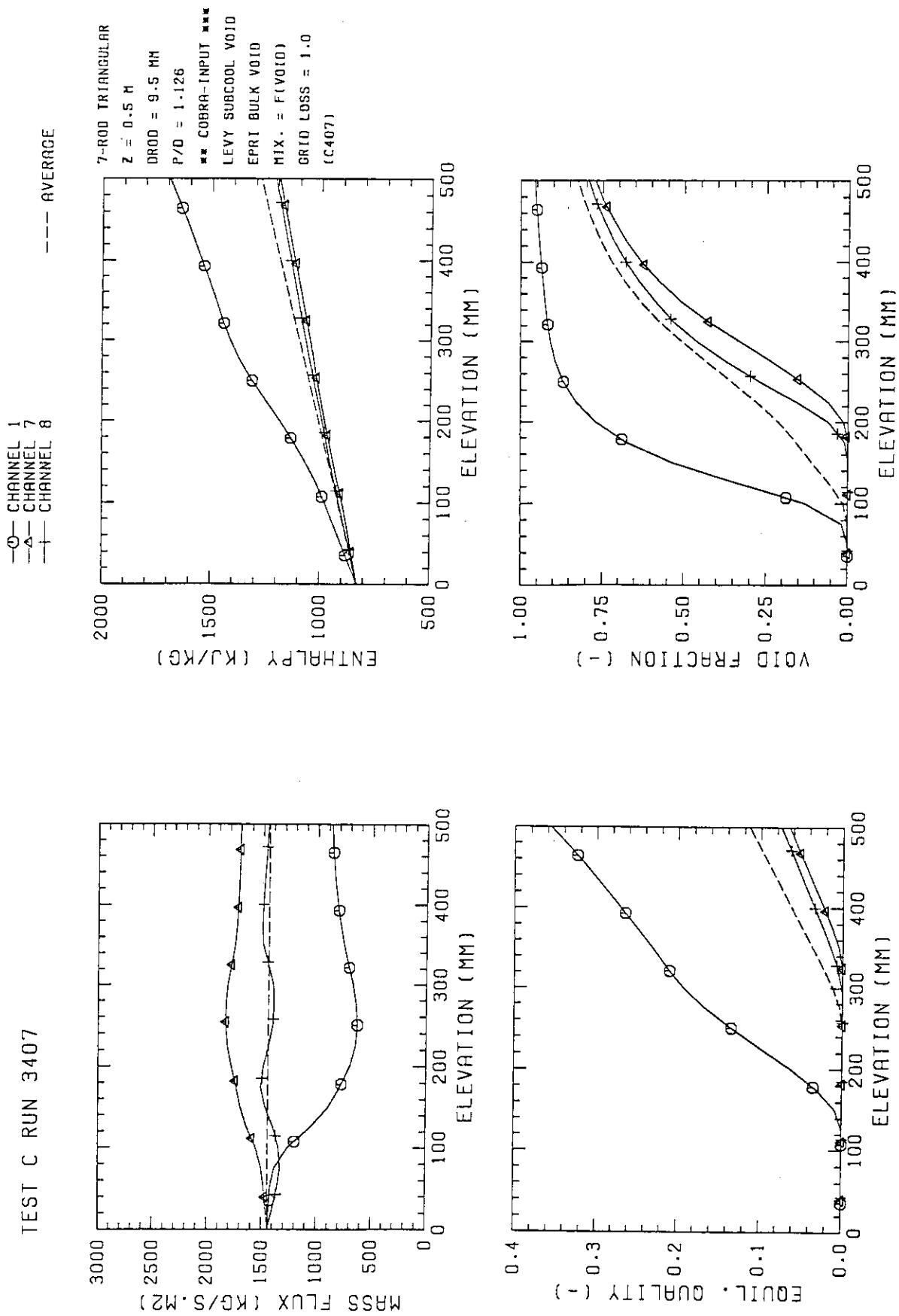
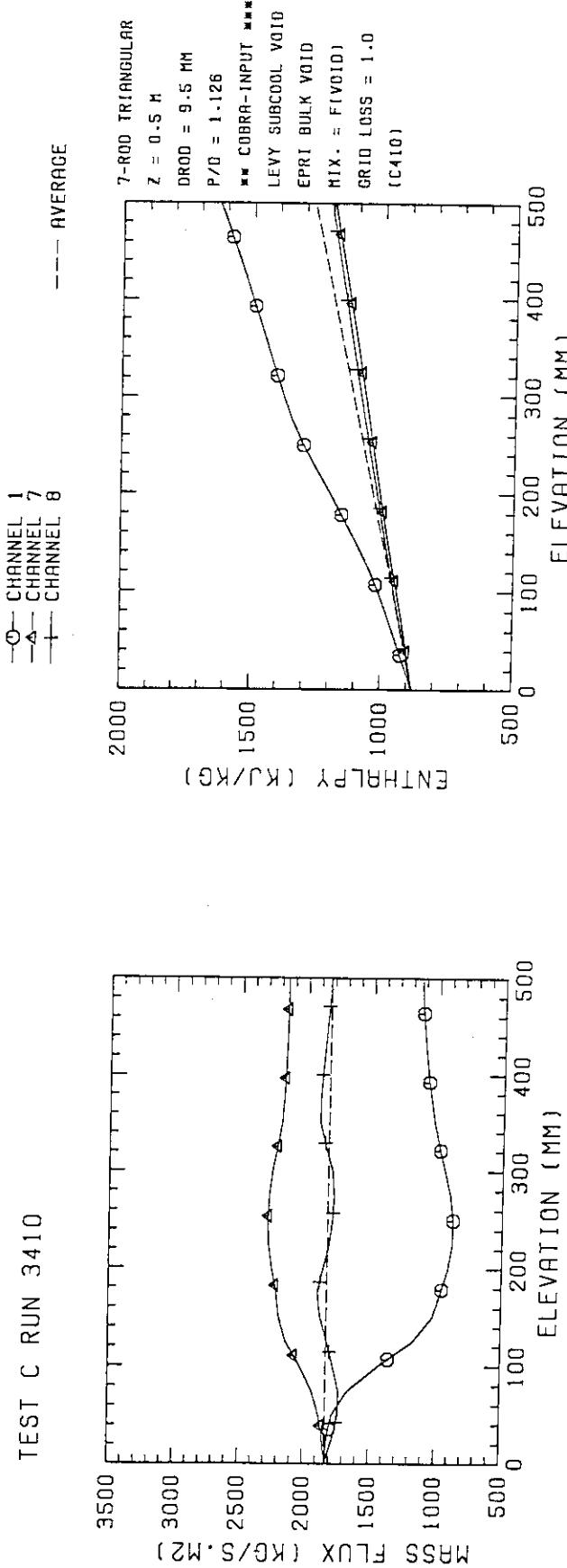


Fig. D.27 COBRA-IW-I analysis results (Run 3407)

TEST C RUN 3410



JAERI-M 90-044

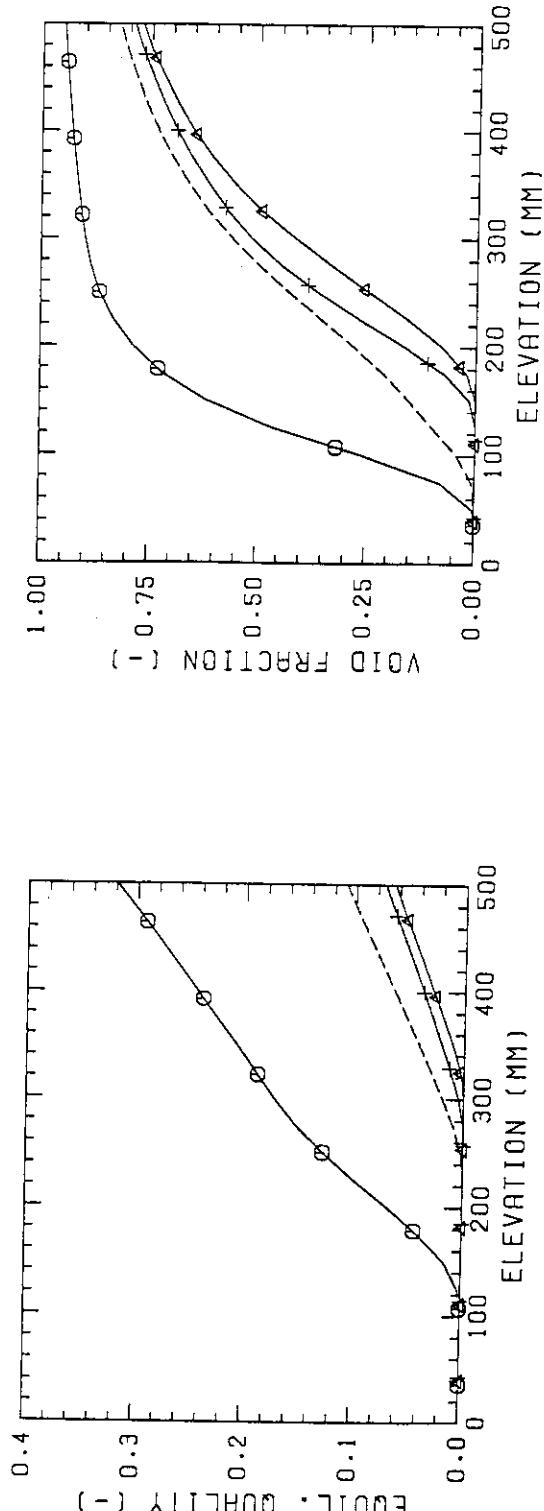


Fig. D.28 COBRA-IV-I analysis results (Run 3410)

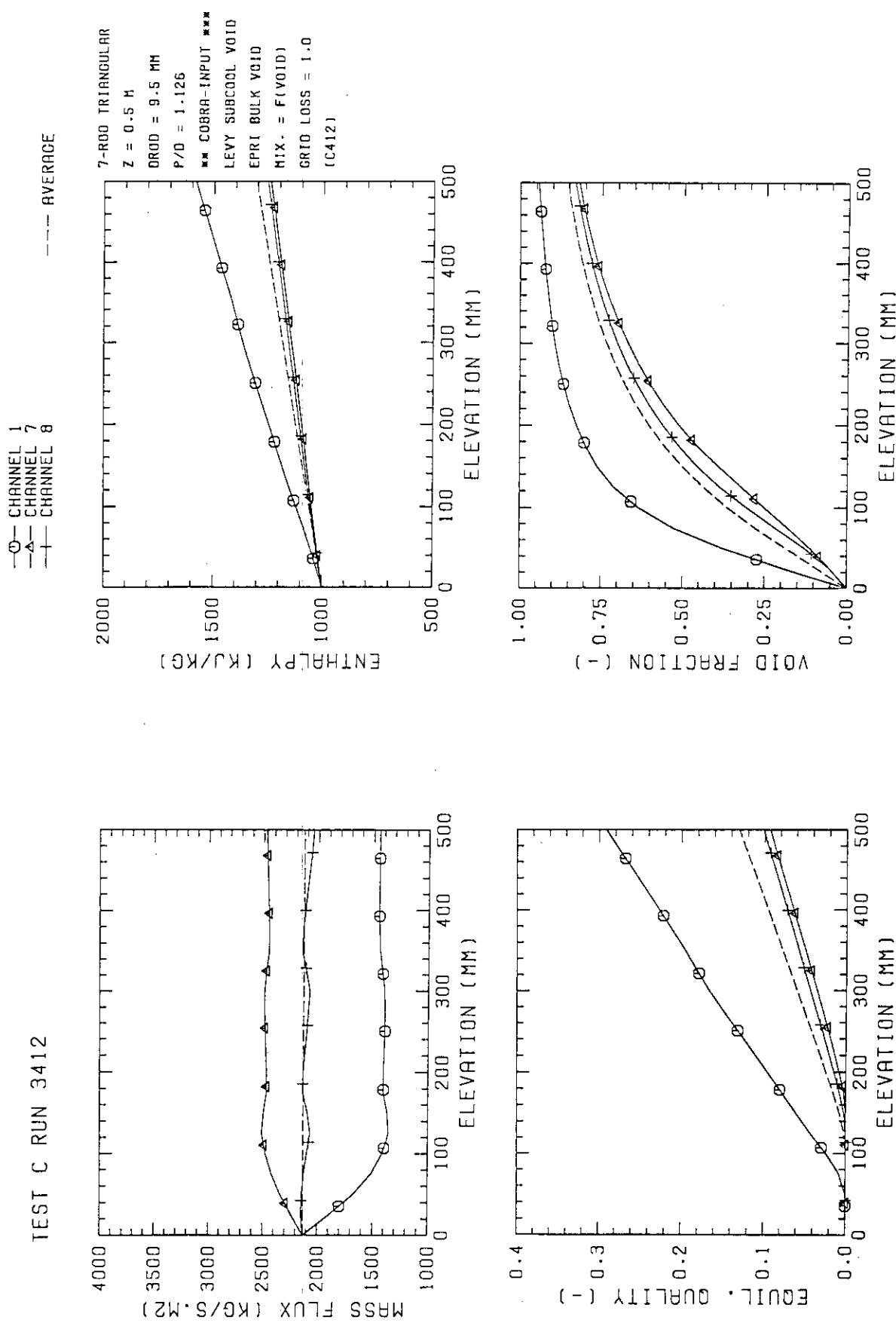


Fig. D.29 COBRA-IV-I analysis results (Run 3412)

TEST C RUN 3415

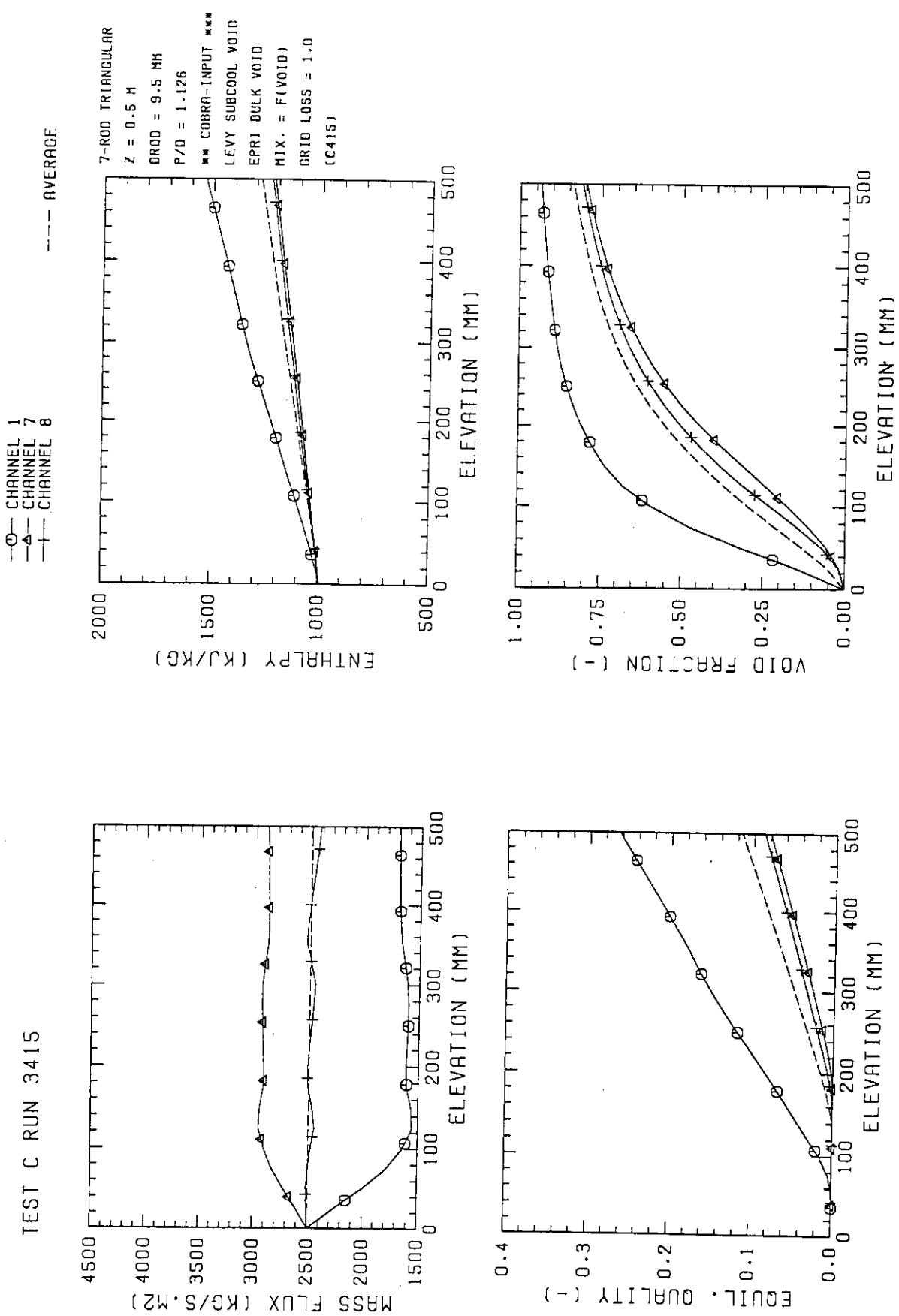


Fig. D.30 COBRA-IV-I analysis results (Run 3415)

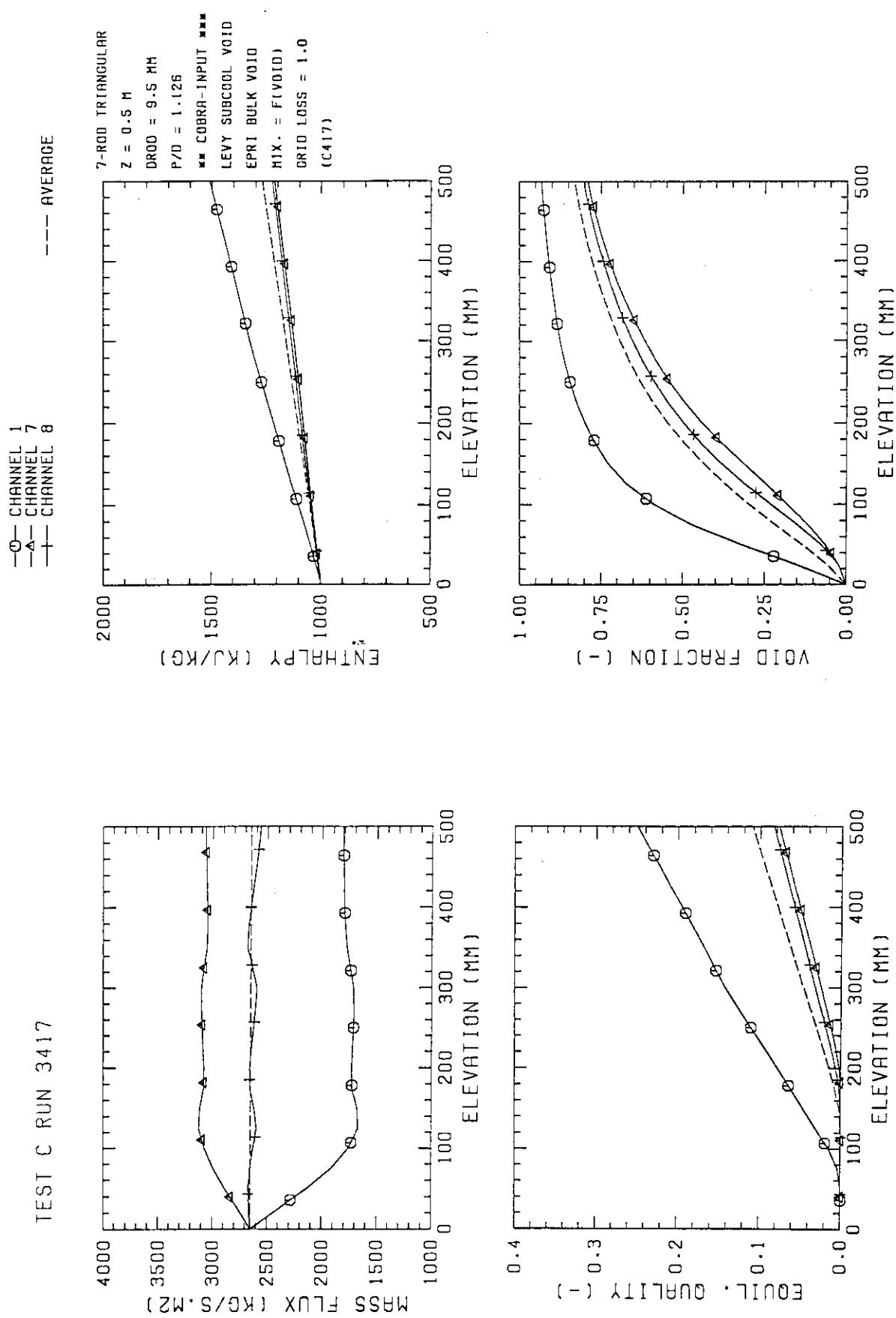
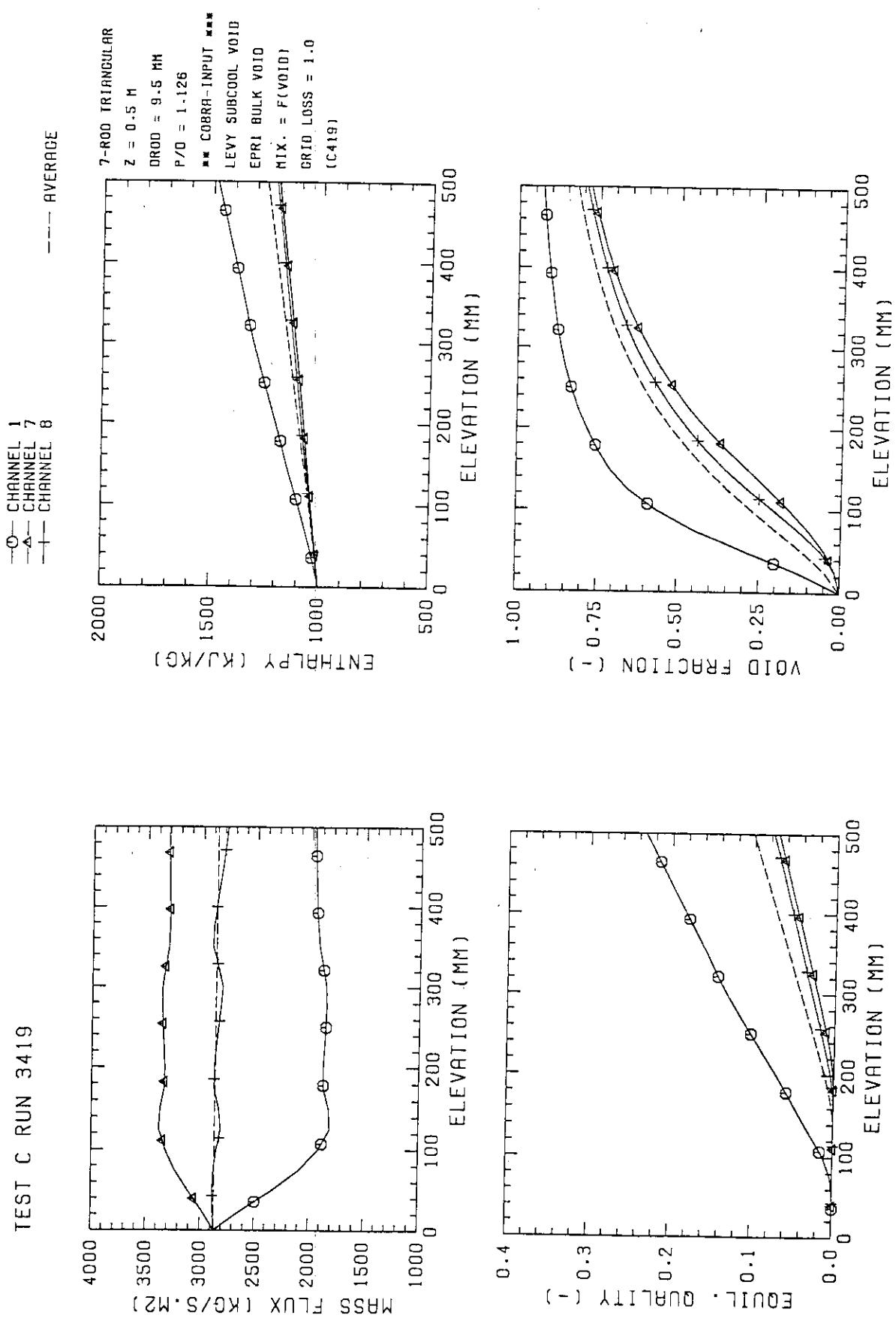


Fig. D.31 COBRA-IW-I analysis results (Run 3417)

TEST C RUN 3419



JAERI-M 90-044

Fig. D.32 COBRA-IV-I analysis results (Run 3419)

TEST C RUN 3421

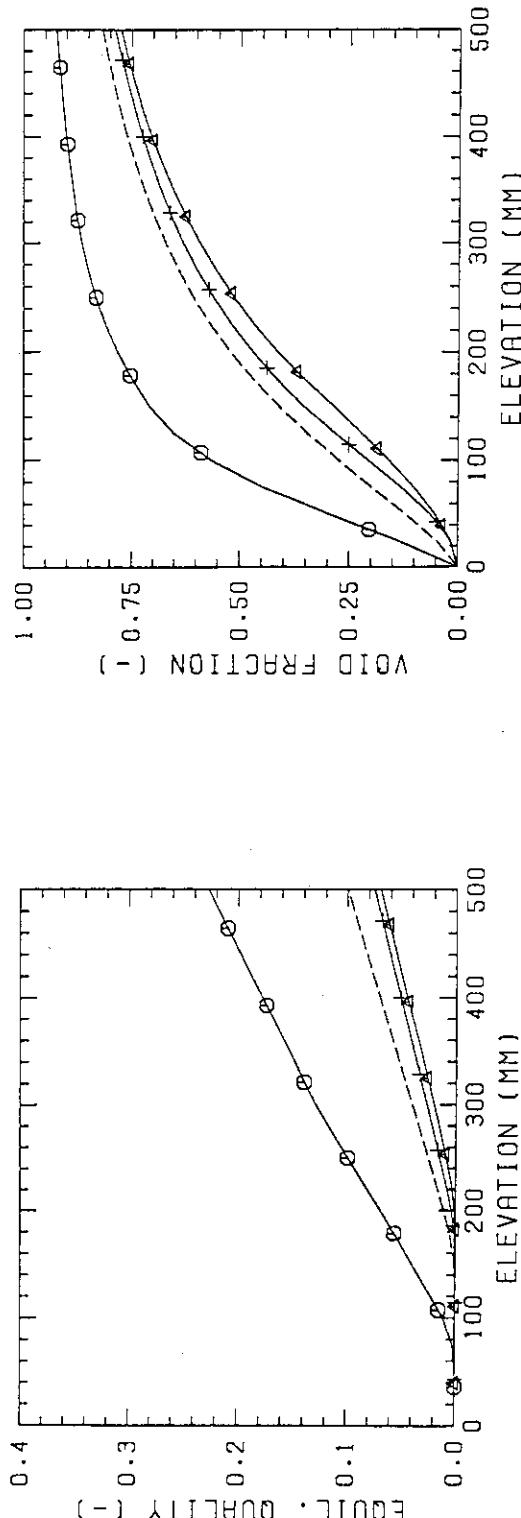
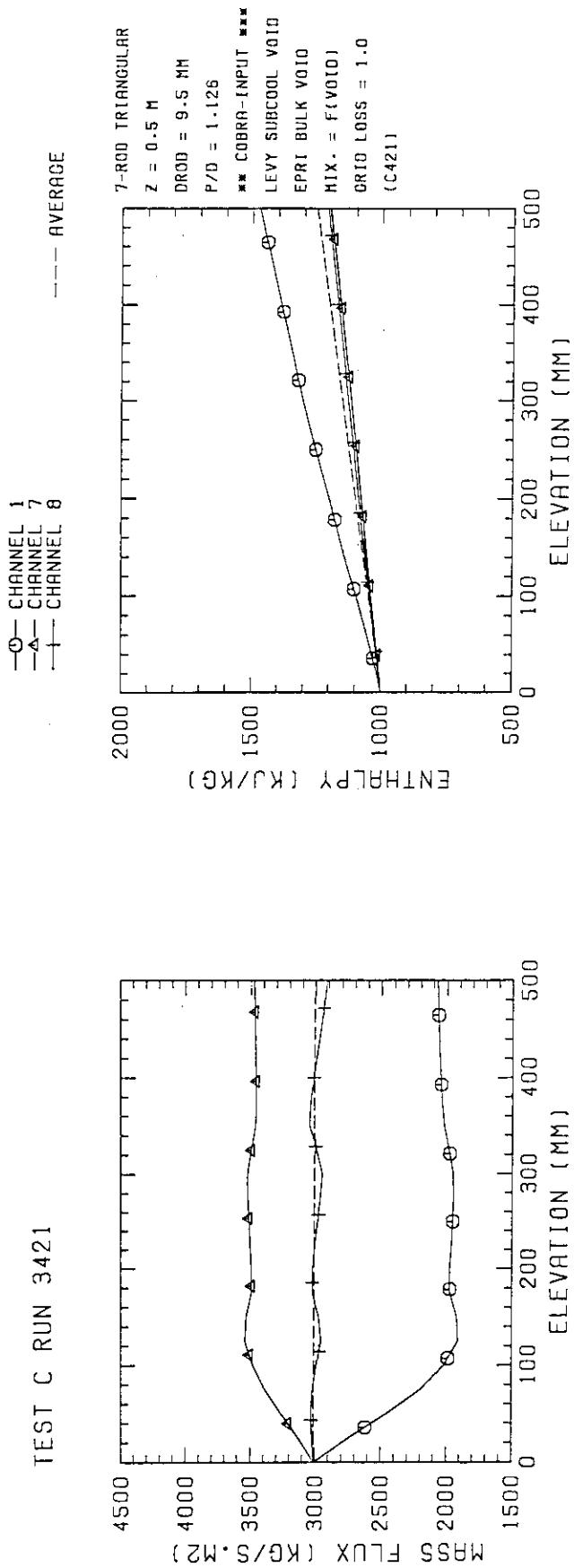


Fig. D.33 COBRA-IV-I analysis results (Run 3421)

TEST C RUN 3526

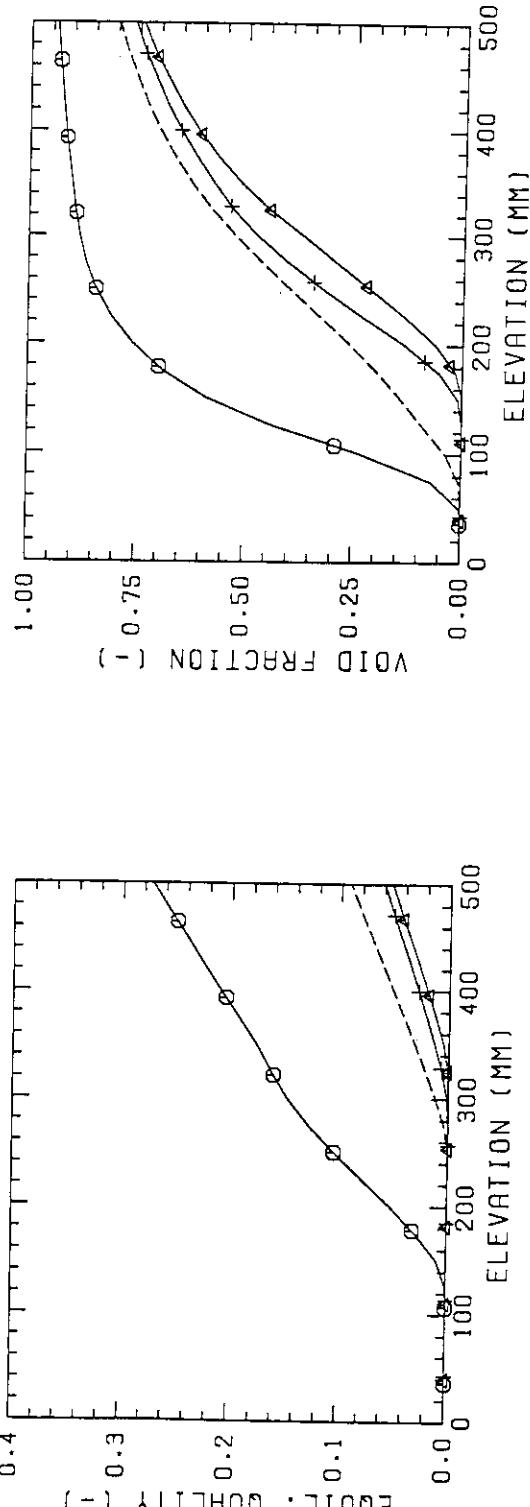
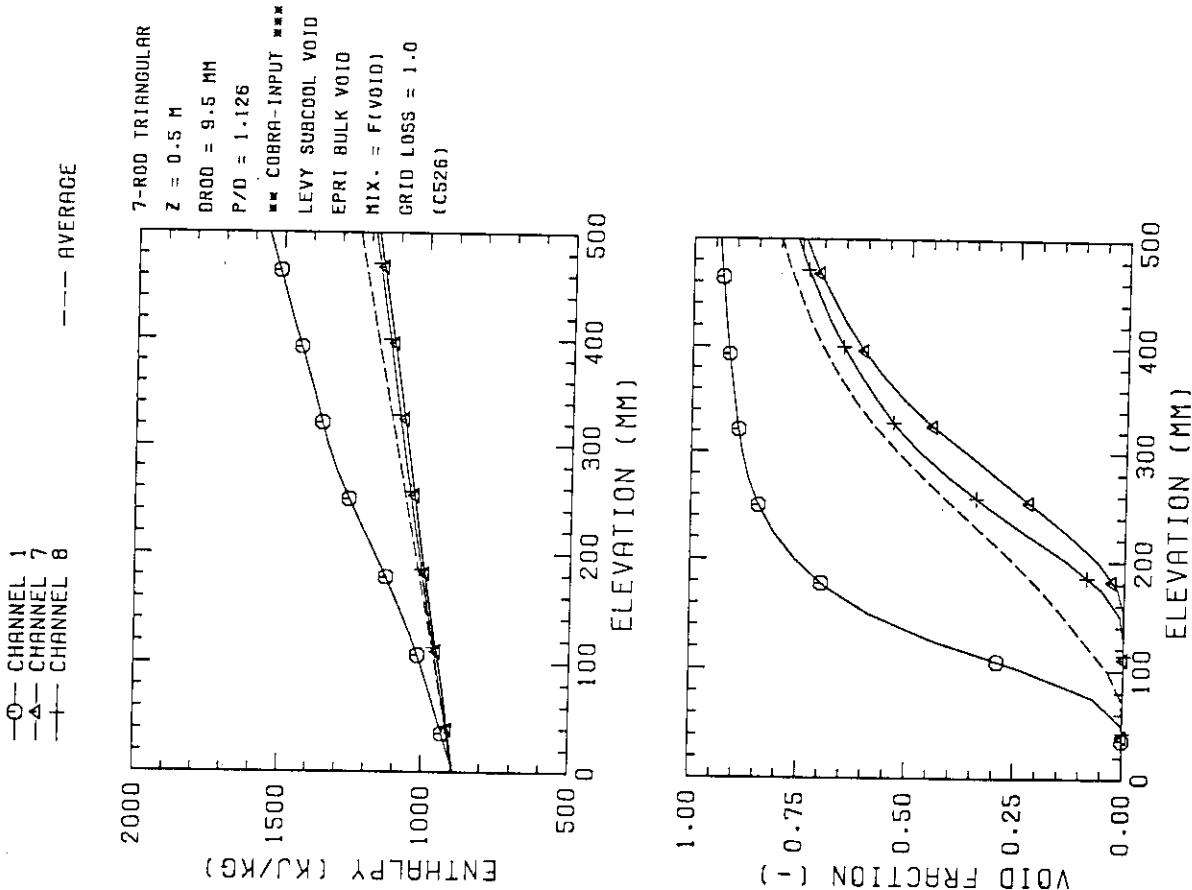
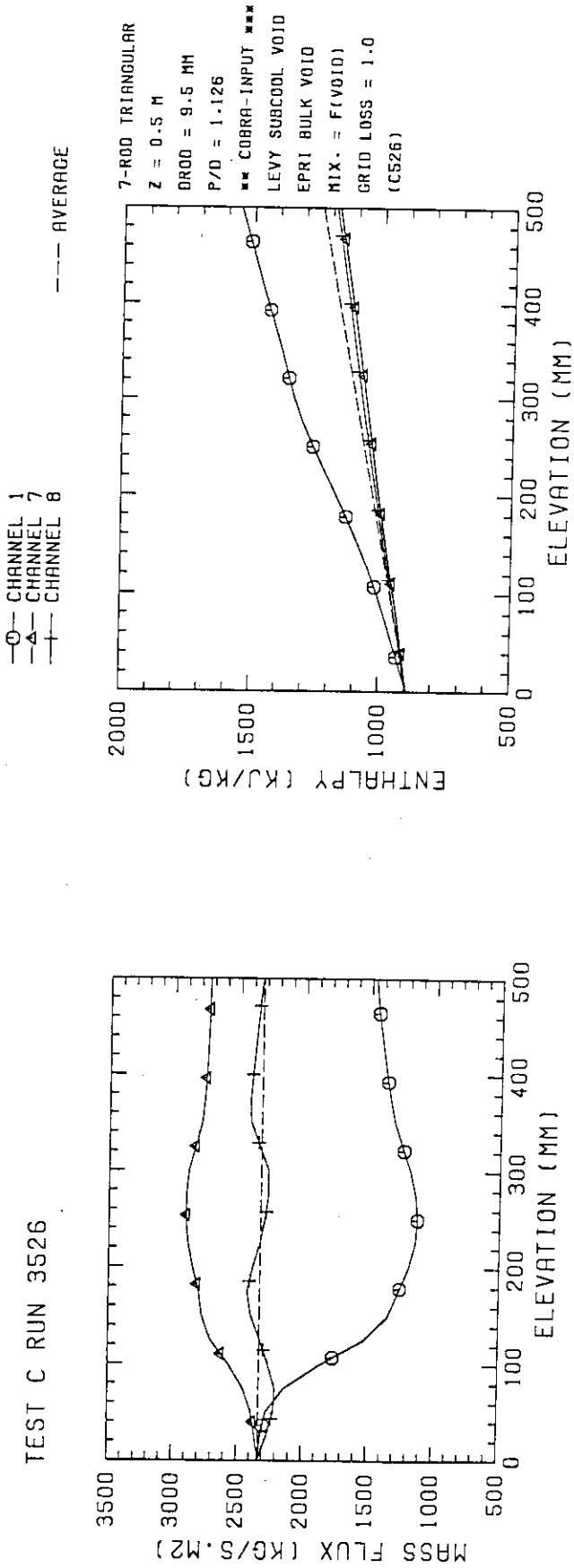


Fig. D.34 COBRA-IV-I analysis results (Run 3526)

TEST C RUN 3528

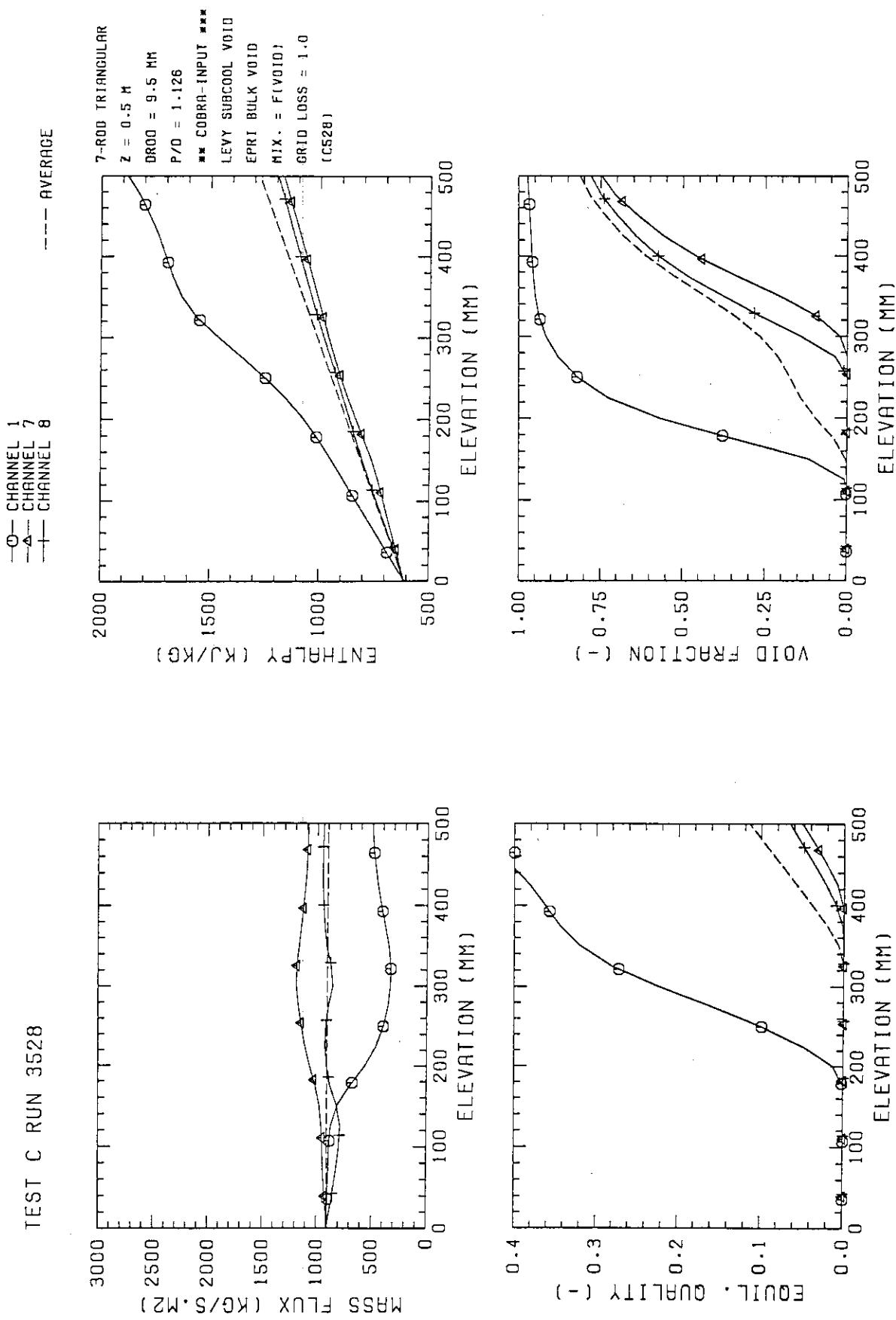
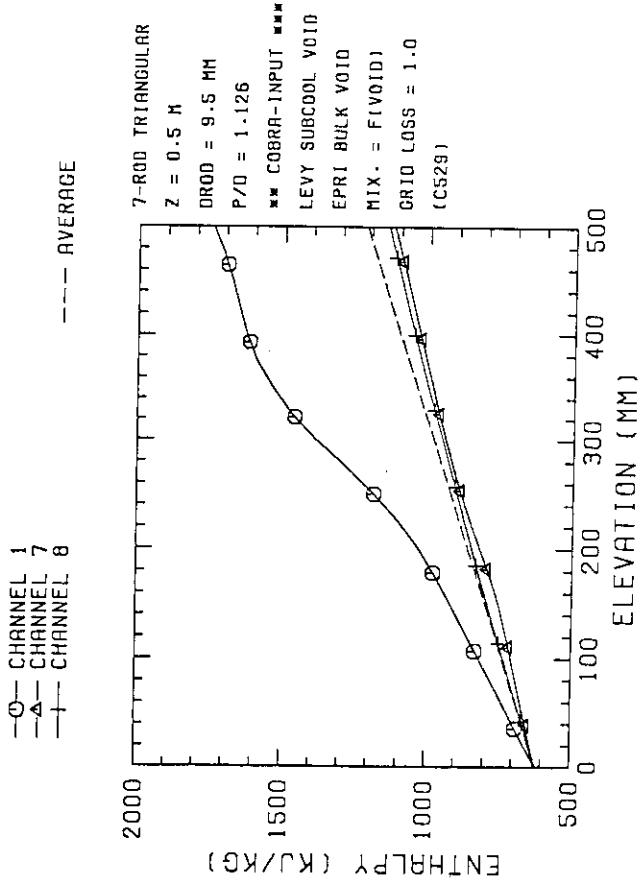
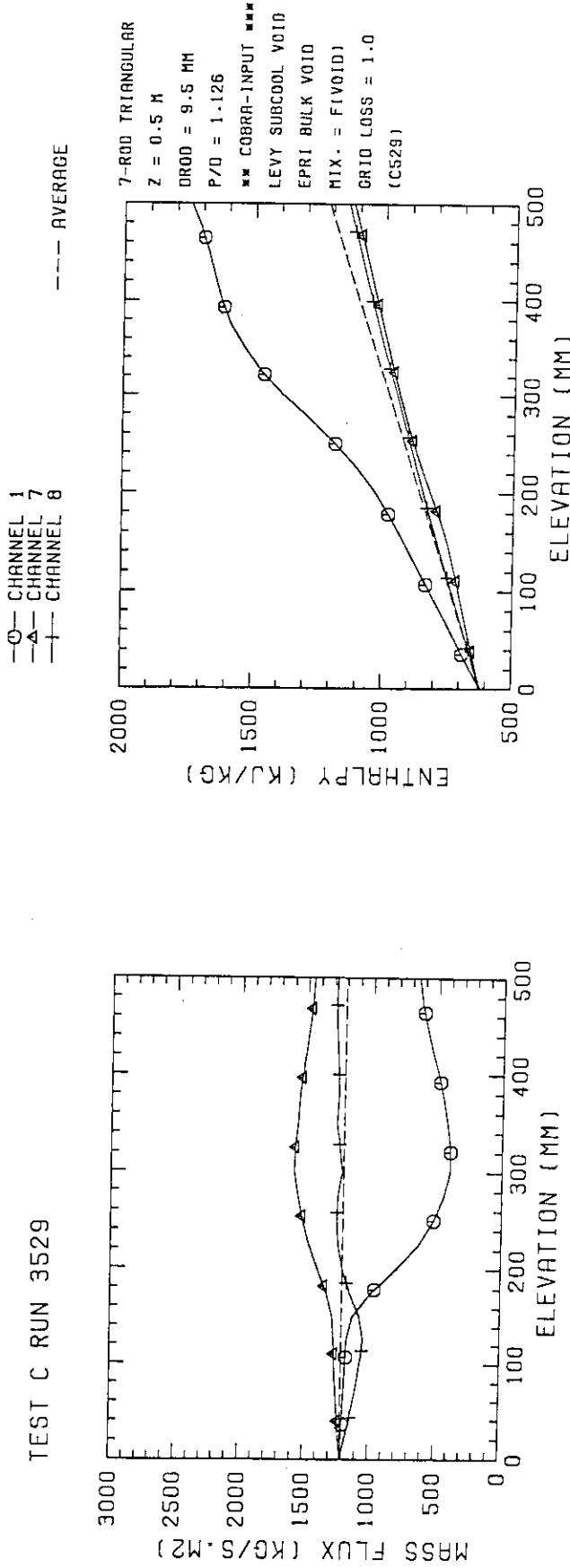


Fig. D.35 COBRA-IV-I analysis results (Run 3528)

TEST C RUN 3529



JAERI-M 90-044

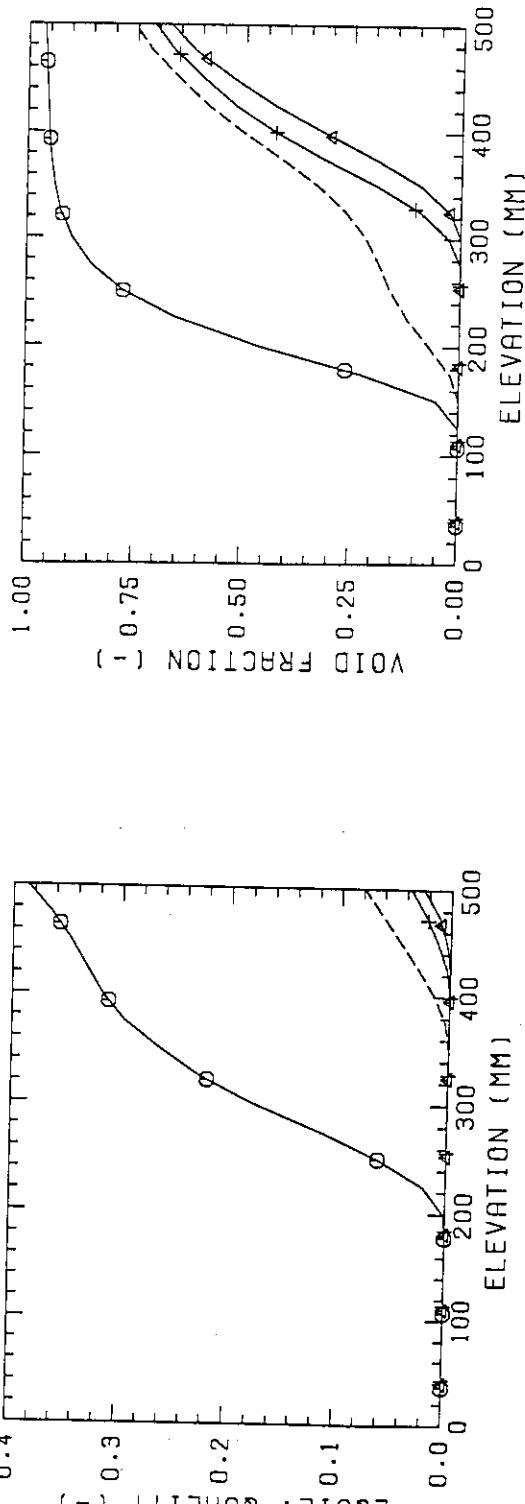


Fig. D.36 COBRA-IV-I analysis results (Run 3529)

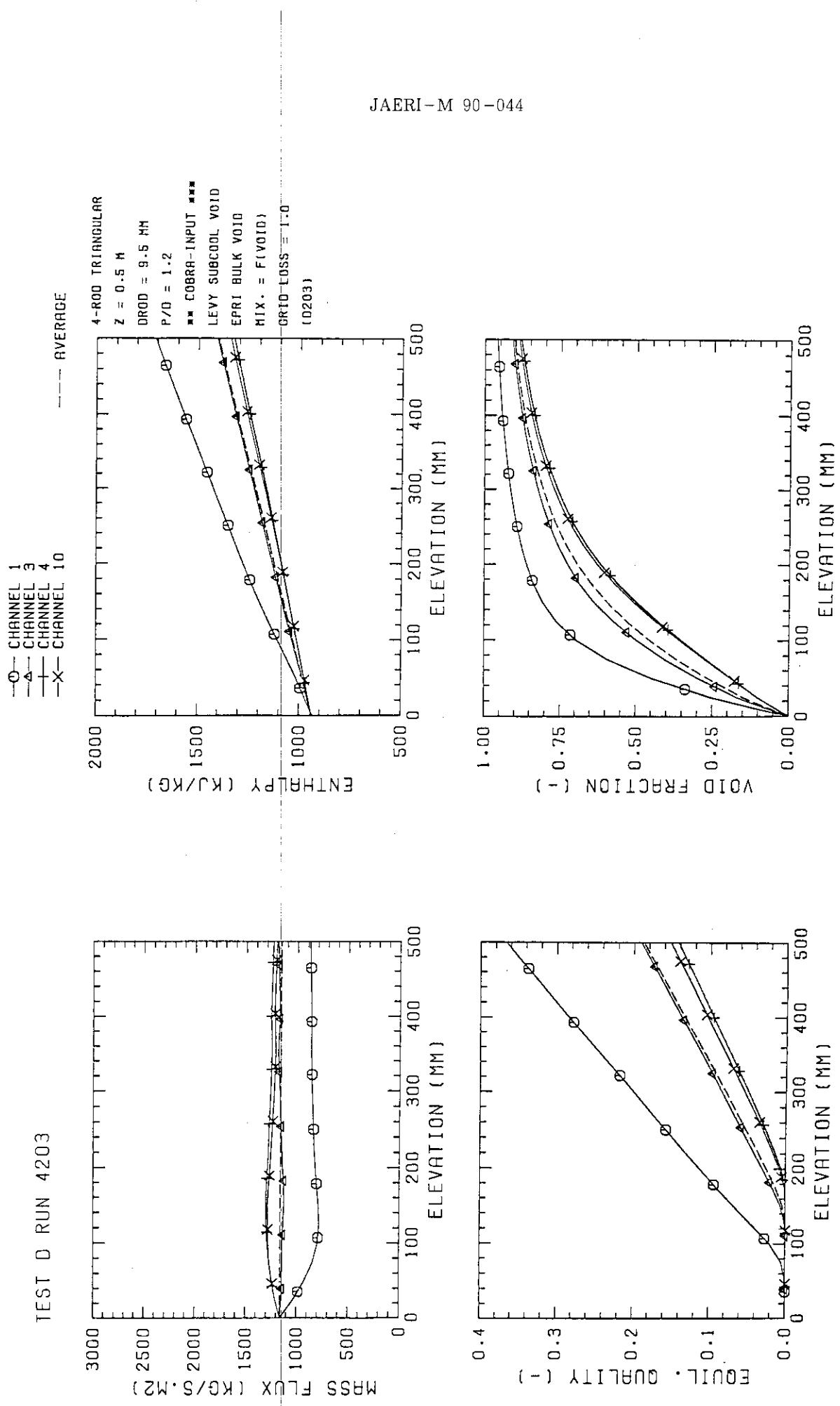


Fig. D.37 COBRA-IW-1 analysis results (Run 4203)

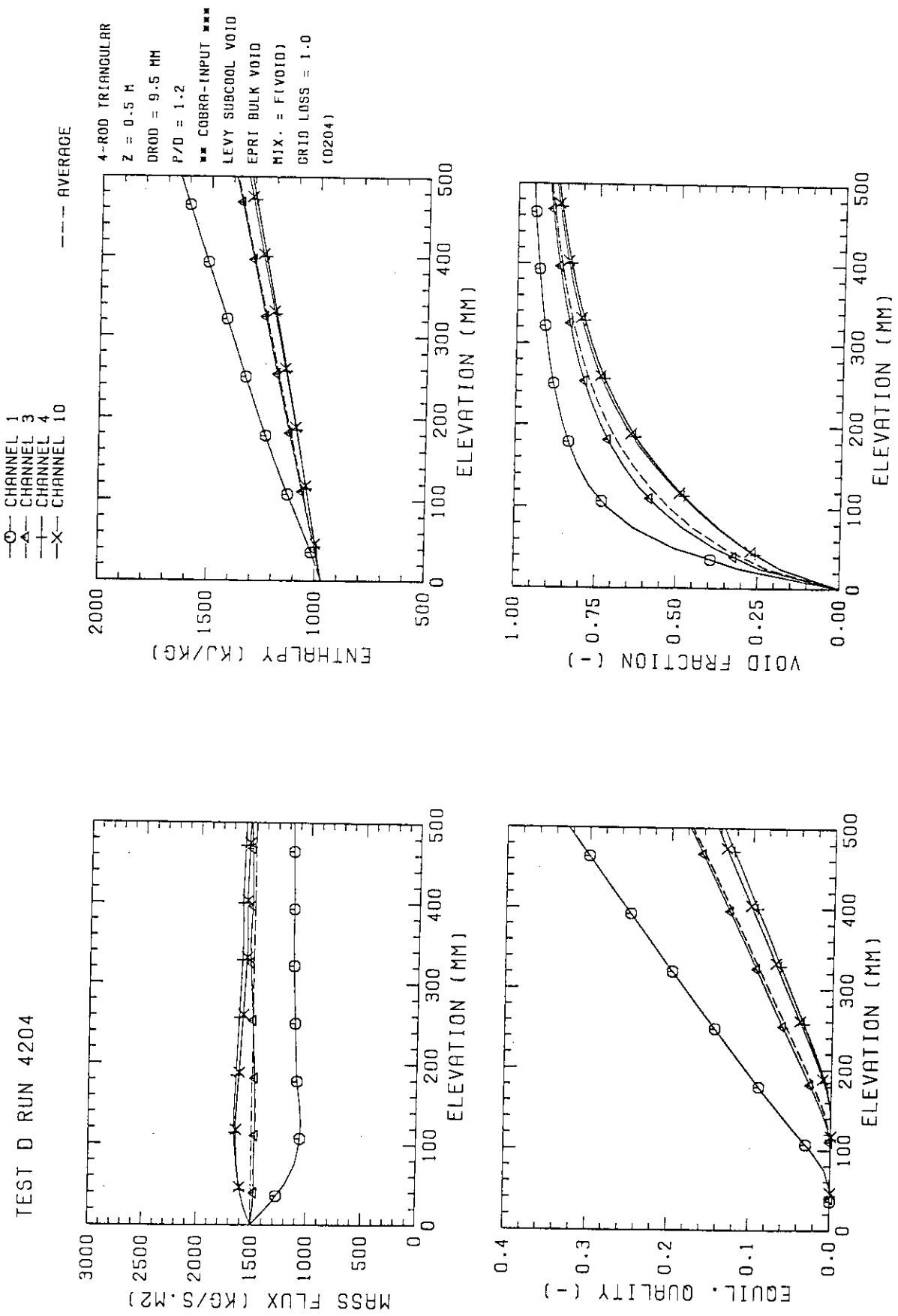


Fig. D.38 COBRA-IV-I analysis results (Run 4204)

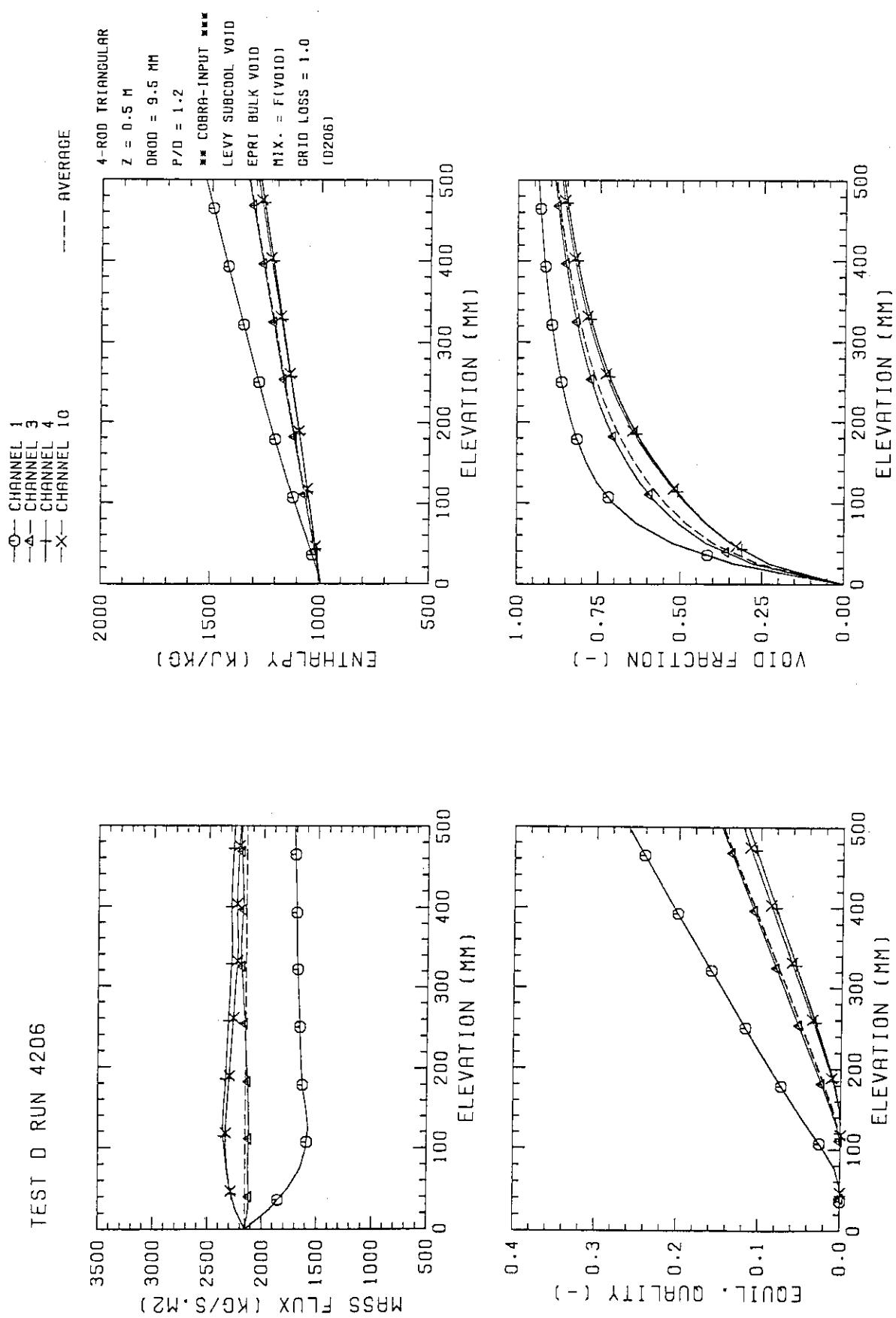


Fig. D.39 COBRA-IV-I analysis results (Run 4206)

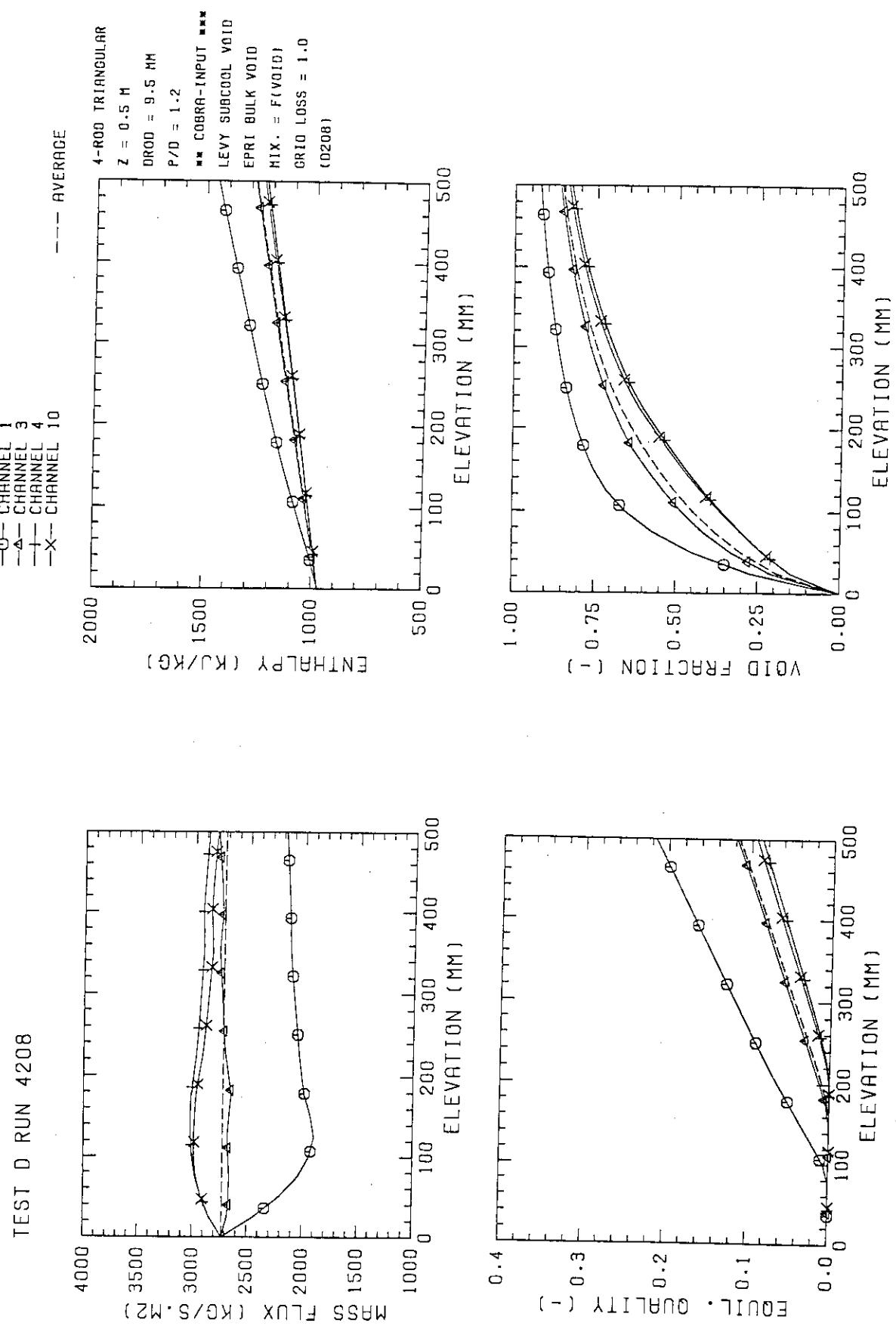


Fig. D.40 COBRA-IV-I analysis results (Run 4208)

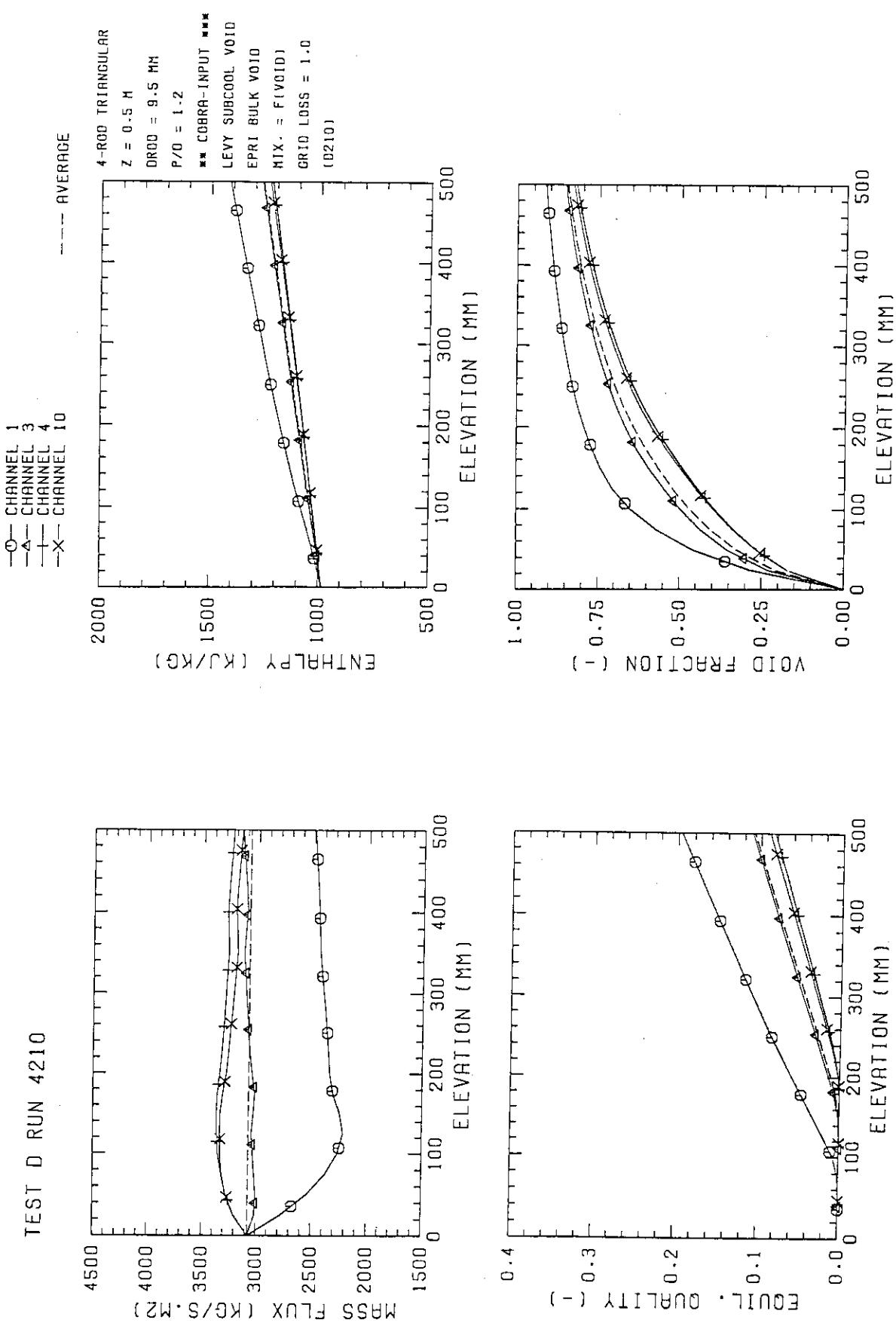


Fig. D.41 COBRA-IV-I analysis results (Run 4210)

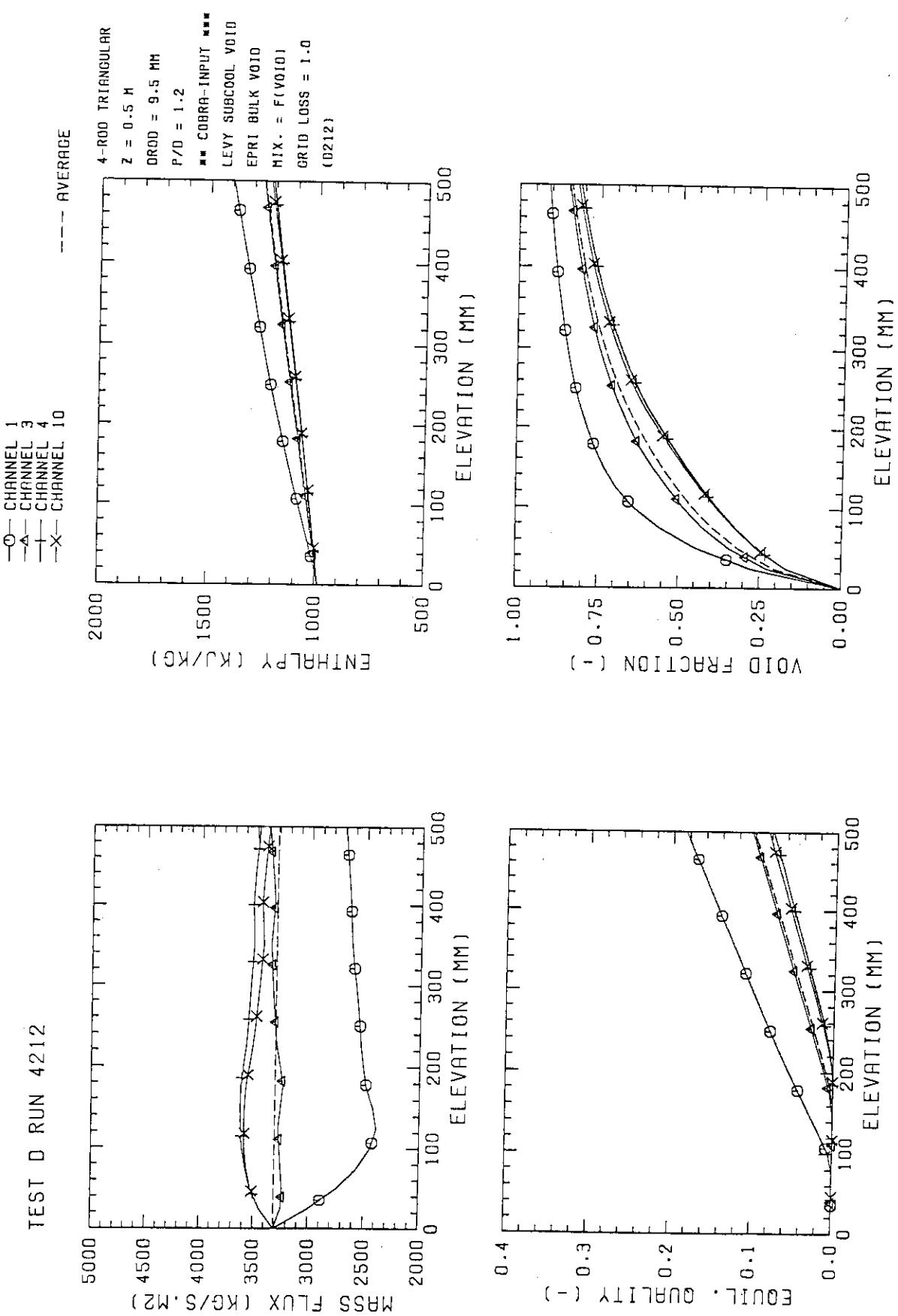


Fig. D.42 COBRA-IV-I analysis results (Run 4212)

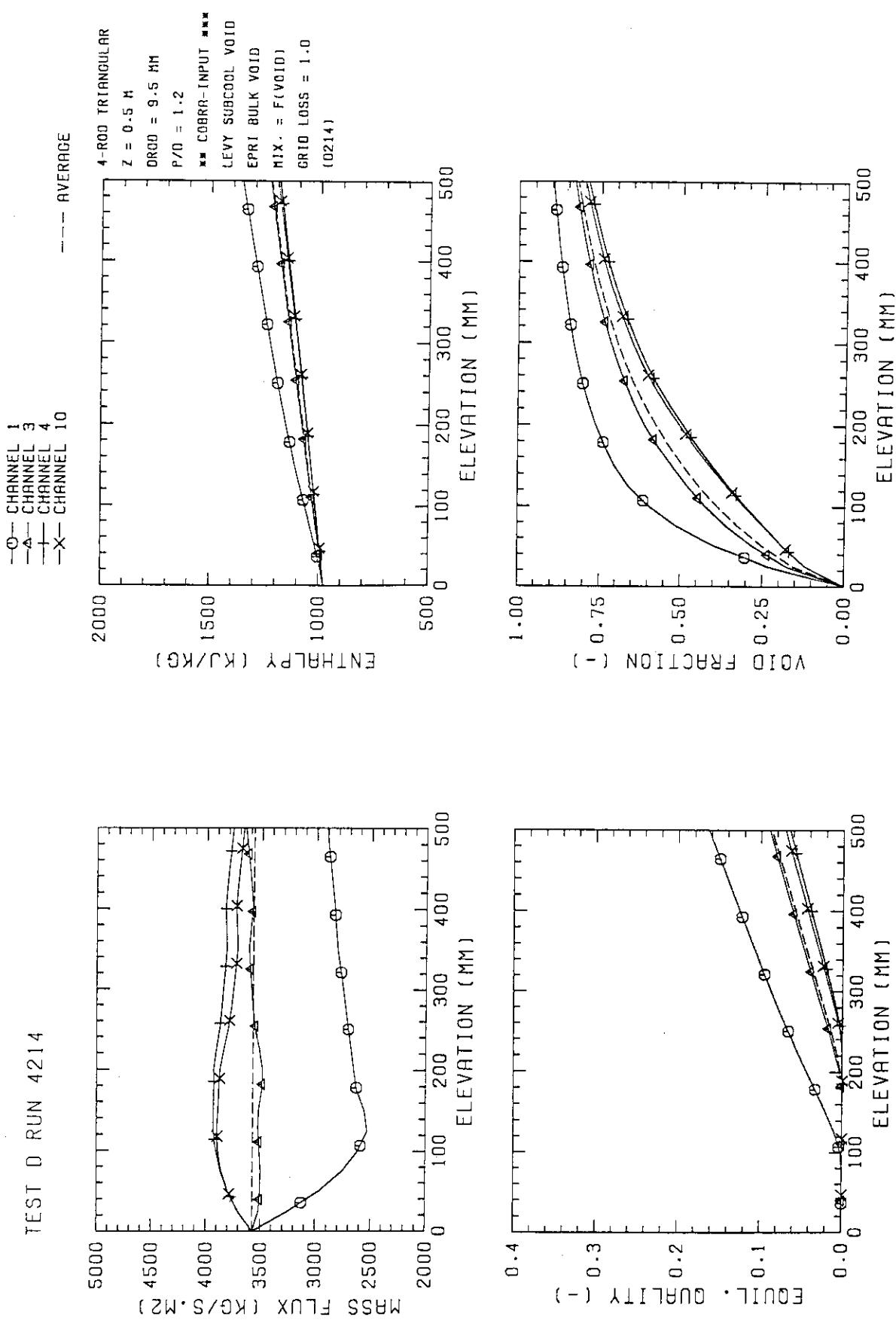


Fig. D.43 COBRA-IV-I analysis results (Run 4214)

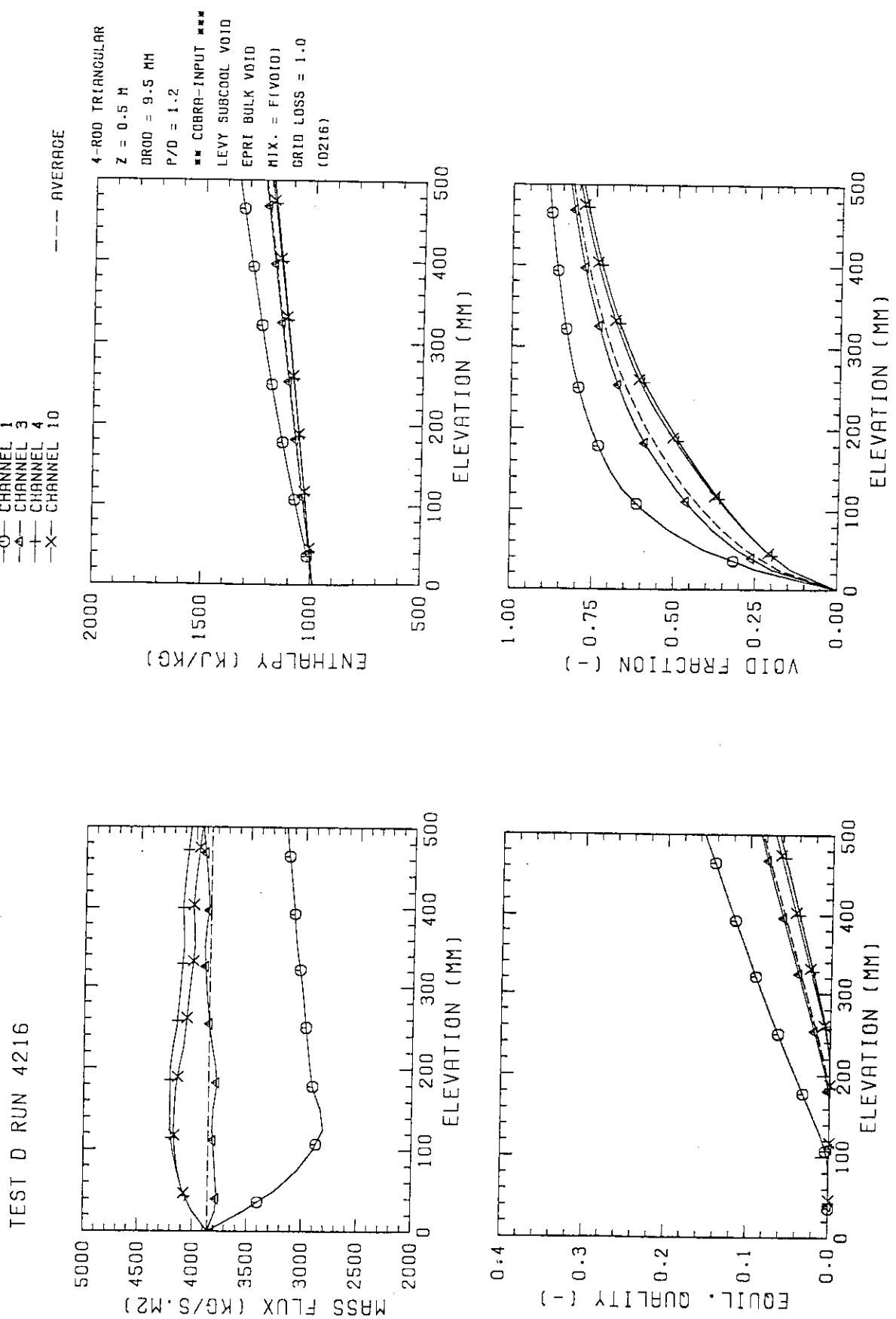


Fig. D.44 COBRA-IV-I analysis results (Run 4216)

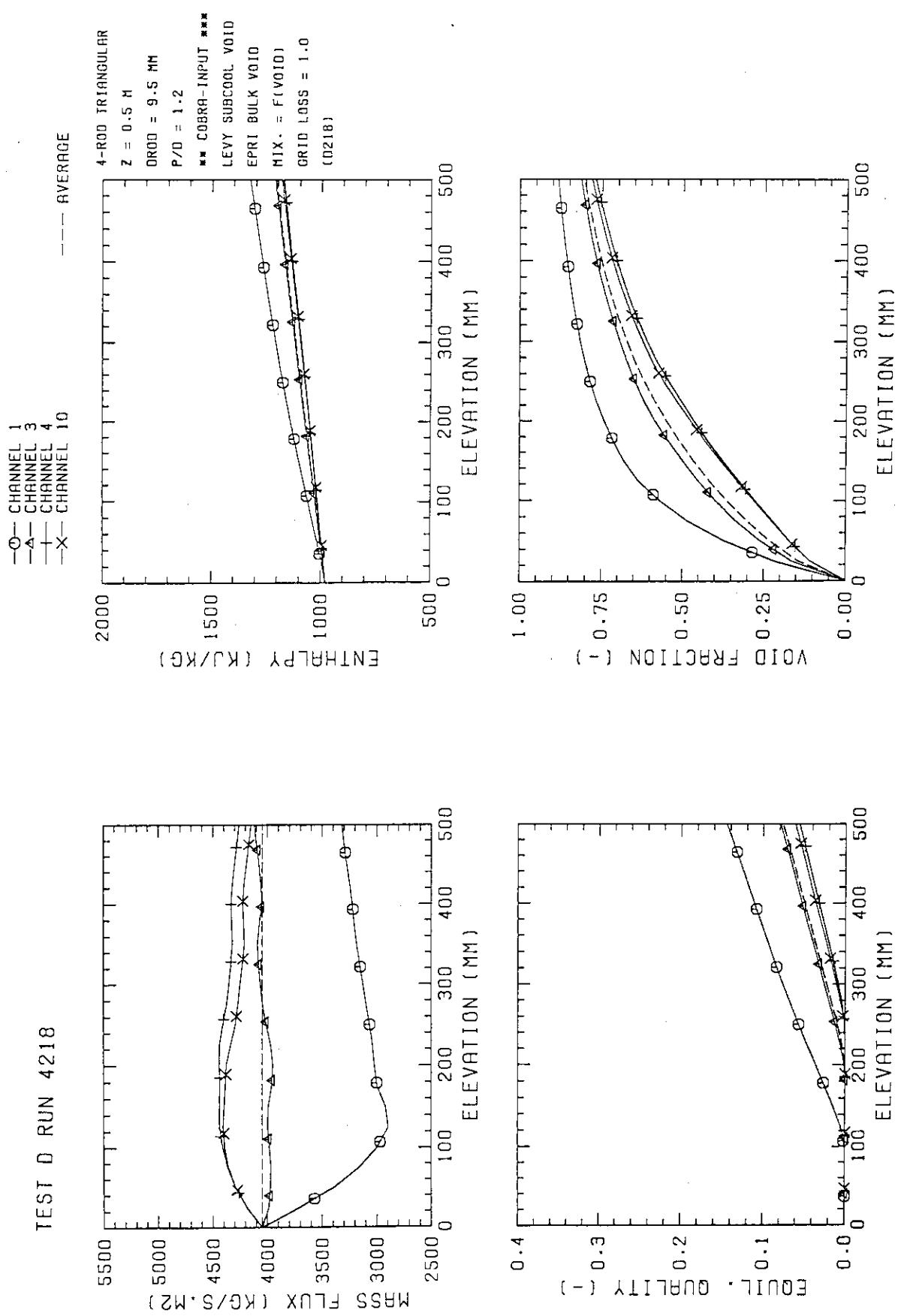


Fig. D.45 COBRA-IV-I analysis results (Run 4218)

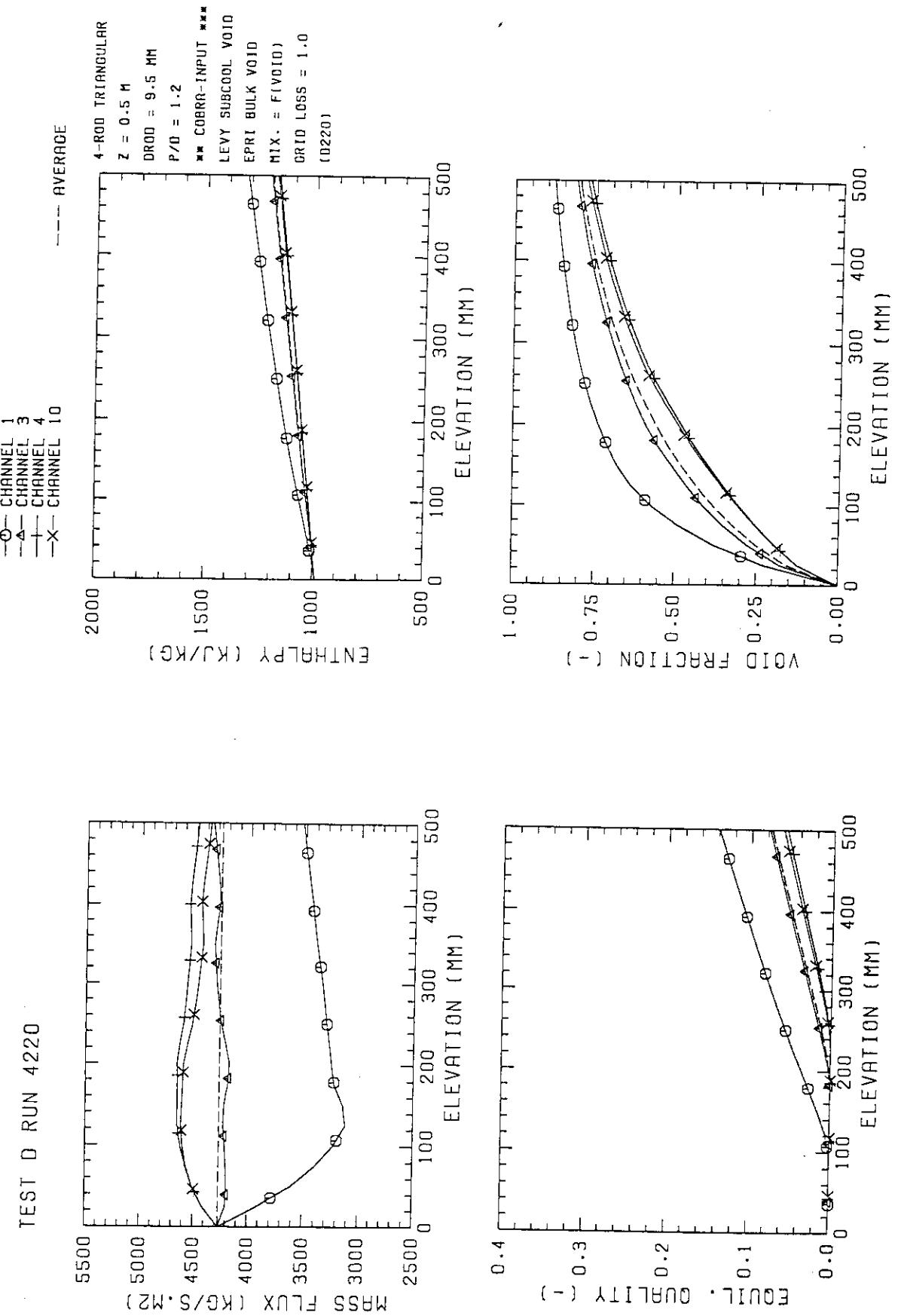


Fig. D.46 COBRA-IV-I analysis results (Run 4220)

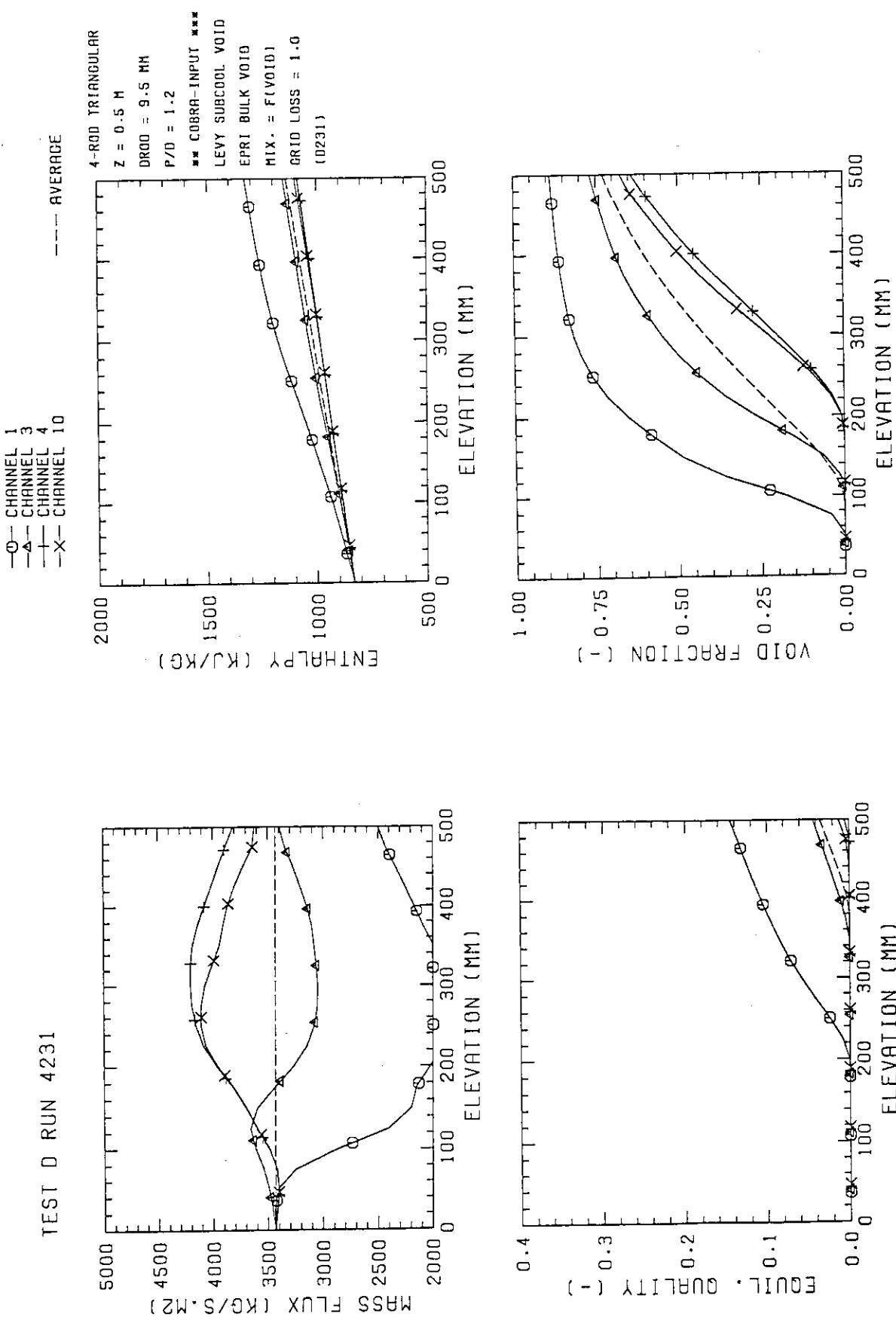


Fig. D.47 COBRA-IV-I analysis results (Run 4231)

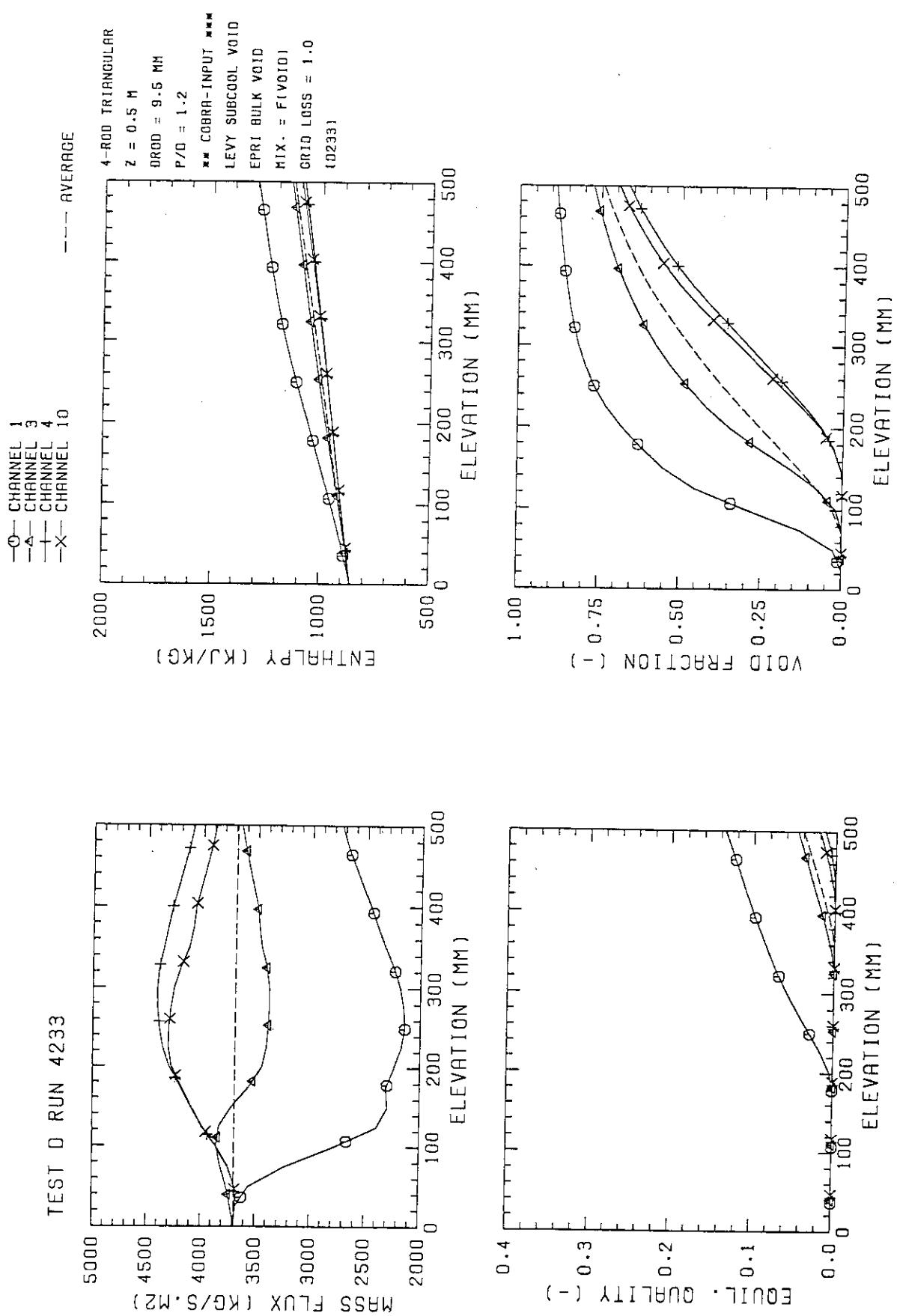


Fig. D.48 COBRA-IV-I analysis results (Run 4233)