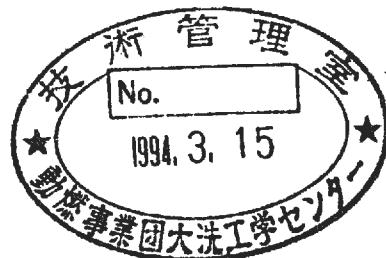


分 置

# FBR安全解析コードSAS4Aの物質移動モデルの改良

— 固体片を含む溶融燃料の流動・閉塞モデルの改良 —

1993年11月



動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

FBR安全解析コードSAS4Aの物質移動モデルの改良  
—固体片を含む溶融燃料の流動・閉塞モデルの改良—

丹羽 元\*

要 旨

FBR安全解析コードSAS4Aの燃料破損後物質移動挙動モデルLEVITATEは三流体モデルであり、その第三の速度場に固体片（チャンク）燃料が割り当てられている。SAS4Aが解析対象とするFBRにおけるATWS事象の初期過程では、燃料ピンの崩壊型破損時にその中に含まれているこの固体片が溶融燃料の流動、固化、閉塞の生成に重要な役割を果たしており、特に後続の遷移過程へ移行する際の物質配位に関する境界条件を支配する。従ってここではまずこのチャンクモデルの改良を実施した。改良されたモデルは、流動関係では、チャンクと構造材壁との摩擦モデル、流動様式を考慮したチャンクと気相成分とのドラッグモデル、閉塞関係では、チャンク体積率の増大による閉塞生成モデル、流路サイズ減少箇所におけるチャンク径に依存した単純閉塞モデル及びアーチ形成による閉塞生成モデル、そして圧力差による閉塞破壊モデルである。以上のモデル改良の後、CABRI E13試験解析による検証を実施した。さらに実機への適用解析を行い、同モデルの妥当性を確認した。本モデルの開発は、不確かさの比較的大きい後続の遷移過程への接続条件を明確化できるとの点でSAS4Aの実機適応性を格段に向上させるものである。また、将来炉として想定できる低ボイド反応度炉心における炉心崩壊事故時の低過出力での事象推移の解析へ向けても、本研究は道を開いている。なお、本研究で開発されたモデルは、SAS4Aの日独仏統一版SAS4A.REF94に採用されることに決定している。

---

\*大洗工学センター安全工学部高速炉安全工学室

**Improvement of Material Motion Model in SAS4A FBR Safety Analysis Code**  
**- Improvement of the Hydrodynamics and Jamming Model of the Fuel Flow**  
**with Solid Fuel Chunks -**

Hajime NIWA\*

## ABSTRACT

The SAS4A, an FBR safety analysis code, has a material motion model for analysis of post fuel failure accident progression. This model, named LEVITATE, is a three-velocity field model, and the third velocity field is assigned for solid chunk fuel component. In the initiating phase of the ATWS accident of FBR's, which is the subject of the SAS4A, solid fuel chunks generated at the disruption-type fuel pin failure play an important role in the flow, freezing and jamming of the molten fuel. Therefore, the chunk model has been improved in this study. Models improved are as follows:

hydraulics related models;

- friction model between chunks and structure wall,
- drag term between chunks and gas mixture dependent on flow regime,

jamming related models;

- jamming due to increased volume fraction of chunks,
- jamming of large chunks at contraction point,
- jamming due to arch formation at contraction point, and
- break up of jamming due to pressure gradient.

These models have been validated through experimental analyses of CABRI E13. These models have also been applied to reactor cases, and their validity has been confirmed, then problems to be solved in the future have been pointed out.

This model decreases the uncertainty of the boundary conditions to the succeeding transition phase, thus adoptability of SAS4A to the reactor cases has been very much improved. Furthermore, the improved SAS4A allows us to investigate the early termination scenario of the accident which could be highly expected in future FBRs with decreased boid reactivity.

It was agreed upon among PNC, KfK, and CEA to include this model into their next unified version of SAS4A, which will be called as "SAS4A.REF94".

---

\* O-arai Engineering Center, Safety Engineering Division, FBR Safety Engineering Section

目 次

## 第Ⅰ部

1 序 .....	1
2 チャンクモデル改良の概要 .....	2
2. 1 基本モデルの改良 .....	2
2. 2 ジャミングモデルの改良 .....	4
2. 3 固化モデルの改良 .....	7
3 検証解析とその考察 .....	9
3. 1 CABRI試験解析 .....	9
3. 2 実機適用解析 .....	10
4 結論 .....	13
参考文献 .....	15

## 第Ⅱ部

Improvement of the Chunk Flow and Freezing Model .....	17
(第4回SAS4A専門家会議OHP)	

## 第Ⅲ部

Reactor Application Study .....	79
(第4回SAS4A専門家会議OHP)	

# 第 I 部

## 1 序

FBR安全解析コードSAS4Aの燃料破損後物質移動挙動モデルLEVITATEは三流体モデルであり、その第三の速度場に固体片（チャンク）燃料が割り当てられている。SAS4Aが解析対象とするFBRにおけるATWS事象の初期過程では、燃料ピンの崩壊型破損時に燃料ペレット周辺部の固体殻領域がチャンクを形成する。この固体片が溶融燃料の流動、固化、閉塞の生成に重要な役割を果たしているため、ここではまずこのチャンクモデルの改良を実施する。対象とするモデルの範囲は、流動に関するモデル、ジャミング形成に関するモデル、及び固化に関するモデルである。

これらのモデル改良の後、CABRI E13試験解析による検証を実施する。さらに60万kWeクラス炉への適用解析を行い、同モデルの有効性を確認した上、今後の課題を摘出する。

本報告書は3部構成である。第Ⅱ部は1993年10月6日から8日の間にKfKで開催された第4回SAS4A専門家会議にて発表、討議に使用したOHP集であり、モデル改良に関する詳細、検証作業の詳細が図表を含めて英文で示してある。第Ⅲ部も同じ会議にて使用したOHP集であり、実機適用解析の詳細が示されている。第Ⅰ部では第Ⅱ部及び第Ⅲ部の資料の概要を和文で説明した。

なお、本研究で開発されたモデルは、SAS4Aの日独仏統一版SAS4A.REF94に採用されることに決定している。

## 2 チャンクモデル改良の概要

日独仏共同CABRI-II炉内安全性試験計画においては、燃焼度12%の高燃焼度燃料を用いて、実機におけるULOF時の現実的な出力過渡を模擬した比較的緩やかなエネルギー投入による燃料破損後挙動試験を実施している。E13試験はその代表的な試験であり、特にその試験後の金相写真は、物質の移動挙動に対して有益な知見を与えてくれる。Fig. 1.2.1はE13のフィッサイル頂部の金相写真であるが、これから以下のような知見が得られる。

- 溶融燃料流の中には1～2 mmの大きさの固体片（チャンク）が存在する。
- そのチャンクにはFPガスのスウェーリングによる密度低下が見られた。
- フィッサイル燃料の軸方向端部においては燃料ペレットがクラックに沿って崩壊したと考えられる2～3 mmの大きなチャンクが存在し、これが流路閉塞を生じさせて燃料の流出を阻害している。

スペクトルの硬い実機の条件ではこれとは異なる現象となる可能性にも注意しなければならないが、基本的に起因過程においてはチャンク燃料の存在が燃料の流動、停止に対して大きな役割を果たしているであろうことが理解できる。以下の研究は主としてこの知見に基づいて展開されている。

### 2. 1 基本モデルの改良

#### 2. 1. 1 チャンクと気相間のドラッグ項の改良

本節の改良については、第Ⅱ部1. 1を参照のこと。

LEVITATEでは、流動様式として気泡流と環状流とが考えられている。気泡流においては、溶融燃料と溶融スティールとの混合融体が流路の大部分を占める連続相を為し、その中に気泡とチャンクとが一様に分布している状態が想定されている。この場合、チャンクと気泡とは互いに接触面積を持っておらず、したがって運動量交換も考慮されてい

ない。しかし燃料破損直後の溶融燃料が比較的少ない時間領域においては、同モデルでは、気泡とチャンクの表面を溶融燃料／スティールの混合融体が薄い液膜で覆っている状態となり、現実とかけ離れてしまう。この問題を解決するために、気泡流においても、チャンクと気相成分との間のドラッグを考慮できるようにモデルを改良した。

## 2. 1. 2 チャンクと構造壁との摩擦モデルの改良

本節の改良については、第Ⅱ部1. 2を参照のこと。

ここでの改良は以下の2点である。

— 気泡流においてもチャンクと構造材壁との摩擦を考慮すること

— チャンクと壁との摩擦モデルの改良

前者の背景は、前節2. 1. 1で述べたと同じであり、混合融体が常にチャンクと壁との接触を阻んでいるとのオリジナルモデルの不都合を是正した。

後者の改良は以下の理由による。第Ⅱ部1. 2に示すとおり、オリジナルモデルにおける摩擦は、固体と壁との滑り摩擦によるモデルである。しかし実際にはチャンクは壁と衝突し、あるいは壁に沿って転がりながら、あるいは固着と固着部の剥離とを繰り返しながら進んで行くのが現実である<sup>(1)</sup>。よってオリジナルモデルの定式化を完全に改め、チャンクを通常の流体と見做してチャンクの速度に依存した摩擦力が働くとする、Blasiusタイプの摩擦力を導入した。ただし摩擦係数はCABRI試験解析から求めることとする。

このモデルの利点は、オリジナルモデルでは、摩擦力が大きいとチャンクの速度が正負に振動する可能性があったがそれがなくなること、摩擦係数をチャンクの体積率やサインの関数とすることによって閉塞挙動をより実現象に近い形で模擬できる可能性があること、などである。

## 2. 1. 3 燃料崩壊時のチャンクサイズ決定モデルの改良

本節の改良については、第Ⅱ部1. 3を参照のこと。

オリジナルモデルでは、燃料崩壊時のチャンクの大きさは、入力値で与える方法と崩壊位置での固体殻形状から求める方法の2つがあった。ここでは後者のモデルを更に発展させて2つのオプションを追加した。オプション1では、燃料崩壊時のペレットの固体殻の厚さをチャンク直径とする。オプション2では、リング状の固体殻の断面積をクラックの存在を想定して8等分し、その一つの面積と同面積の円の直径を以てチャンクの直径とするものである。以後の解析ではこのオプション2を標準的に使用している。

## 2. 2 チャンクジャミングモデルの改良

### 2. 2. 1 チャンクに対する最大体積率

本節の改良については、第Ⅱ部2. 1を参照のこと。

オリジナルモデルでは、チャンクの体積率に対する上限ではなく、溶融燃料と同様に流路断面積の95%程度までは詰め込まれ得た。しかし例えば单一サイズの球の整列充填を考えると、第Ⅱ部2. 1に示すごとくそのポロシティは48%から26%であり、更に高次の充填を考慮しても20%程度のポロシティは残る<sup>(2)</sup>。他方、ランダムな充填の場合には、40%程度のポロシティは残る<sup>(2)</sup>。従って、チャンクの体積率の上限としては60%程度が現実的と考えられる。本モデル改良では、この体積率の上限値は入力で与えることとし、あるノード内のチャンクの体積率がこの入力値を超えると流速をゼロとすることとした。

チャンクを第3の速度場として持つLEVITATEでは、このようにジャミングした領域を気相が通過することは可能であり、溶融燃料溶融スティールの混合融体が通過することもまた可能である。ただし混合融体の場合には溶融燃料がチャンク燃料に固着することにより漉しとられてしまい、溶融スティールのみがこのジャミング領域を通過することを模擬することが可能である。

### 2. 2. 2 大きなチャンクによる単純閉塞

本節の改良については、第Ⅱ部2. 2を参照のこと。

縮流部において、その流路サイズを超えるようなチャンクは縮流部へ侵入することができないことは明らかである。このような単純な閉塞も改良モデルに加えた。

また、一般的にはチャンク同士の固着により、その実効的なサイズが大きくなることも考えられる。これも単純閉塞や、チャンク自身の自由な回転の阻害によってジャミングの原因となり得るが、ここではモデル化するには至っていない。

### 2. 2. 3 縮流部でのアーチ形成による閉塞

本節の改良については、第Ⅱ部2. 3を参照のこと。

LEVITATEのオリジナルのジャミングモデルでは極めて小さなチャンクサイズが陰に仮定されており、縮流部では流路断面積の縮小分の運動量を失うとの効果のみが考慮されていた。しかし、化学工学における粉粒体工学の分野においても、粒体のサイズが出口径の4～5分の1の大きさとなると、縮流部にアーチを形成して閉塞を生じることが経験的に知られており、1957年にはLangmaidらによって実験的に閉塞形成条件が求められた<sup>(3)</sup>。本研究では、Langmaidらの実験式に基づき、流路の形状に依存して、全アーチを作る場合、半アーチを作る場合を想定して、流路サイズとジャミングを形成するチャンクサイズとの関係を求めた。更に、CABRI試験のような単ピン形状の場合と実機のバンドル形状の場合につき流路サイズと水力等価直径との関係を求めることにより、以て、解析コード内にて水力等価直径とアーチ形成臨界チャンクサイズとの関係を求めることができた（第Ⅱ部2.6節のまとめ表を参照）。この関係をLEVITATEに組み込んで、チャンクサイズが隣接ノードの水力等価直径から求められる臨界値よりも大きい場合にはチャンクの流速をゼロとすることとした。

ここで指摘されるべきことは、単ピン形状の方がバンドル形状の場合よりもアーチ形成臨界チャンクサイズは3倍程度大きいことである。このことはすなわち、CABRIの単ピン形状の方がバンドル条件よりも閉塞を生じにくくことを意味している。これはバンドルでのUAB部への燃料の侵入に関してCABRI試験結果の知見を直接外挿することは非

保守側であることを指しているが、これは本モデルに基づく予想に過ぎないため、立証にはさらなる検討が必要である。

## 2. 2. 4 低エンタルピー・チャンクの閉塞

本節の改良については、第Ⅱ部2. 4を参照のこと。

このモデルはCABRIのような単ピン形状に限って使用されるものである。単ピン形状における燃料崩壊時には、全てのチャンクは構造材壁近傍にのみ存在し、バンドル形状の場合のように溶融燃料中に浮いている状態のチャンクは存在しない。すなわち単ピン形状では崩壊直後には全てのチャンクが壁との摩擦を持つことから、可動性は低い。本研究ではこれもジャミングの一種と考え、崩壊直後の低エンタルピー状態ではチャンクの速度をゼロとするモデルを導入した。エンタルピーの閾値は入力値であるが、チャンク自身が溶融潜熱のある程度の割合を得るまでは動けないものと考えるのが妥当であろう。ただしこれは単ピン形状の場合のみに有効なモデルである。

## 2. 2. 5 圧力差による閉塞の破壊

本節の改良については、第Ⅱ部2. 5を参照のこと。

チャンクによって生じるジャミングは決して堅固なものではなく、ある力が加われば破壊されることもある。これは固体燃料の割れを考慮すれば当然であろう。従って本モデルでは、ジャミング領域を挟んである圧力差がついた場合にはジャミングを破壊する（再び速度計算を行う）モデルを組み込んだ。圧力差は入力であるが、20bar程度の圧力差がつけば閉塞の破壊は生じ得るものと考えられる。

## 2. 2. 5 まとめ

以上のモデル改良を表にまとめて示した（第Ⅱ部2.6節参照）。モデルは整数入力変数JAMMODにより選択される。

JAMMOD=1は体積率のみを考慮するモデル、

JAMMOD=2は単ピン形状のモデル、  
JAMMOD=3はバンドル形状のモデル、  
JAMMOD=4はアーチ形成に関する臨界チャンク径と水力等価直径との関係式に現れる係数を入力値で制御可能とするパラメトリックモデルである。これにより、一つの物理モデルによる単ピン形状、バンドル形状における体系的なジャミングモデルが提示されることになる。

## 2. 3 固化モデルの改良

本節の改良については、第Ⅱ部3. 1を参照のこと。  
オリジナルモデルにおけるチャンク及びクラスト燃料の生成モデルでは、固化する溶融燃料量に対して、まず、クラスト燃料生成量を算出し、残った分をチャンク燃料の生成量としている。しかし本来は、溶融燃料のうち、そのエネルギーが流路側へ吸収されたものはチャンク燃料になるべきであり、壁側へ吸収されたものはクラスト燃料になるべきである。今回、このエネルギー吸収比率により、チャンク及びクラスト燃料の生成比率を算出するオプションを追加した。

処理内容としては、SP.LESOEN(SAS4Aの熱伝達に関する計算を行うサブルーチン)でのエネルギー計算時にチャンク燃料生成側とクラスト燃料生成側の溶融燃料エネルギーの吸収比率を算出し、SP.LEFRLU(SAS4Aの溶融燃料の再固化を計算するサブルーチン)において、その吸収比率で各固体燃料の生成量を決定するというものである。以下に溶融燃料から流路側と壁側へ移行するエネルギーと、各固体燃料成分の生成量の決定法を示す。

$\Delta E_{fu}$  : 溶融燃料から吸収されるエネルギー

$\Delta \rho'_{fu}$  : 固化する溶融燃料実密度

・チャンク燃料生成側(流路側)

$\Delta \rho'_{fl}$  : 生成されるチャンク燃料実密度

$\Delta E_{Na}$  : ナトリウムに吸収されるエネルギー

$\Delta E_{se}$  : 溶融スティールに吸収されるエネルギー

$\Delta E_{fl}$  : チャンク燃料に吸収されるエネルギー

$\Delta E_{sl}$  : チャンクスティールに吸収されるエネルギー

$\Delta E_{fv}$  : 燃料蒸気に吸収されるエネルギー

$\Delta E_{sv}$  : スティール蒸気に吸収されるエネルギー

・クラスト燃料生成側(壁側)

$\Delta \rho'_{crust}$  : 生成されるクラスト燃料実密度

$\Delta E_{clad}$  : クラッドに吸収されるエネルギー

$\Delta E_{struc}$  : ストラクチャーに吸収されるエネルギー

$$\Delta \rho'_{fu} = \Delta \rho'_{fl} + \Delta \rho'_{crust}$$

$$-\Delta E_{fu} = \Delta E_{Na} + \Delta E_{se} + \Delta E_{fl} + \Delta E_{sl} + \Delta E_{fv} + \Delta E_{sv} + \Delta E_{clad} + \Delta E_{struc}$$

$$\Delta \rho'_{fl} = \Delta \rho'_{fu} \times \frac{\Delta E_{Na} + \Delta E_{se} + \Delta E_{fl} + \Delta E_{sl} + \Delta E_{fv} + \Delta E_{sv}}{-\Delta E_{fu}}$$

$$\Delta \rho'_{crust} = \Delta \rho'_{fu} \times \frac{\Delta E_{clad} + \Delta E_{struc}}{-\Delta E_{fu}}$$

### 3 検証解析とその考察

#### 3. 1 CABRI試験解析

本節の作業の詳細については、第Ⅱ部4節を参照のこと。

本研究で開発したチャンクモデルの改良部及びジャミングモデルをCABRI-2 E13試験解析により検証した。もとよりこの解析はE13試験の事後解析ではないため、完全に試験結果と一致させることを目的とはしていないが、同モデル導入による効果は明らかになっている。

ここでは以下の10ケースの解析を行い、その傾向を分析把握した。

BASE : 解析のベースとなる、新しいモデルを使用していないケース。

DENSITY : チャンクのスウェーリングを模擬して密度を4000kg/m<sup>3</sup>に低下させたケース

SIZE : チャンクのサイズをオプション2で決定するモデルを使用

FRICTION : 新しいチャンクと壁との摩擦モデルを使用。

DRAG : 新しいチャンクと気相とのドラッグ項モデルを使用

FREEZING : 燃料の固化による質量移行先や量と、熱移行先や量と整合させる

STEELFREEZE : 溶融スティール存在域端部ノードでのスティール固着を許さない

JAM : JAMMOD=2のジャミングモデルを使用

JAM2 : DENSITY + SIZE + DRAG + FREEZING + JAMのケース

INTEGRATED : JAM2 + FRICTIONのケース。全新規モデルを使用。

各ケースの詳細は第Ⅱ部に記されているので、ここではBASEとINTEGRATEDの差異を指摘しておく。

INTEGRATEDケースでは、

－燃料クラストの生成量が明らかに少ない。(2.3節、固化モデルの改良による。)

－フィッサイル部下方でのジャミングは明らかに強い。

－上部での燃料挙動も新規ジャミングモデルの効果が明らかであり、縮流部への燃料

の侵入は明らかに抑制されている。

総じて、BASEケースよりも上方下方への燃料移動は抑制されている。

この他のケースの比較を含めて、以下が結論として導出される。

1. 新規に導入されたモデルの動作はこれらの解析を通じて確認された。
2. ここで提案されたジャミングモデルは未だ初步的なものであるが、得られた結果は少なくともこれまでの分散を過大評価する非保守的な結果を保守的なものに変えるものであり、妥当である。
3. 上記の解析結果において大きな影響を与え得るモデル上の問題点が以下のように摘出された。

—ローカル形状問題として

  チャンクサイズ、スティールと燃料の液滴径、気泡径

—泡状燃料の扱い

### 3. 2 実機適用解析

本節の作業の詳細については、第Ⅲ部を参照のこと。

60万kWe出力炉心<sup>(4)</sup>に対する実機適用解析を通して本改良モデルの適用性を検討した。解析対象とした炉心仕様は第Ⅲ部に示した通り、現在我が国で検討されている通常の炉心である。解析ケースは以下の5ケースである。

BASE	: ジャミングモデルを用いないオリジナルモデルによるケース
JAM1	: チャンクの体積率が60%を超えた場合のみジャミング
JAM3	: バンドル体系でのアーチ生成等によるジャミングケース
LOWEOFF	: JAM3かつ崩壊直後の低エンタルピーでのジャミングは無視
JAMBREAK	: LOWEOFFかつ20bar以上の圧力差でジャミングは解消

各ケースの詳細は第Ⅲ部で述べられているため、ここではBASEの問題点、BASEとLOWEOFFとの差異、LOWEOFFとJAMBREAKとの差異についてのみ記す。

### BASEの問題点

燃料破損後の分散が顕著であり、特に先行破損するCh.1ではUAB部での閉塞を生じていないことが見てとれる。これらのチャンネルにおけるエネルギー投入量はCABRIのBGS4以下であり、かつ相対的な流路断面積はCABRIの単ピン形状よりも小さいにもかかわらず、BGS4で見られたフィッサイル端部での閉塞が模擬されていないのは、非保守側であると考えられる。

### BASEとLOWEOFFとの差異

LOWEOFFケースの方が破損後の燃料分散はジャミングのため緩慢であるが、全反応度は16.29秒までは減少するため、両ケースとも出力はBASEで40Po、LOWEOFFで60Po程度の差異である。しかしLOWEOFFでは崩壊領域上端部でのジャミングのために燃料移動反応度の減少傾向が弱まるため、ボイド反応度の挿入に駆動されて全反応度は16.35秒に1\$に接近する。この時の出力ピークは300Poを超える。また炉心部圧力は40barを超える。この過出力によってまずドップラー反応度が挿入され、次いでジャミングを生じているチャンネルでも燃料溶融によってジャミングが解消し、さらに他のチャンネルにおける燃料の分散が促進されることによって燃料移動反応度が減少して終息へ向かう。

### LOWEOFFとJAMBREAKとの差異

16.29秒以降の燃料移動反応度はJAMBREAKの方が低いことが見てとれる。これはジャミングの破壊を考慮したためである。ただし現在のモデルではひとたびジャミングを破壊するとそのチャンネルでは再ジャミングを考慮できないため、JAMBREAKケースは非保守側である。従って、現実的な燃料のジャミングと再移動挙動はJAMBREAK程に

は分散せず、しかしLOWEOFFよりは分散し易いものと考えられる。即ち、現実的なケースはLOWEOFFとJAMBREAKとの間にあると考えられる。

これらの解析を通じて、以下が結論として導出される。

1. 実機の硬スペクトル、バンドル形状では、CABRI条件と比べてチャンク温度は低くかつ流路断面積は小さい。よってチャンクの挙動が全体の燃料挙動に対してより大きな影響を与えるものと考えられるので、その扱いには十分に注意すべきである。
2. 60万kWe炉心では、保守的なジャミングを考慮すると全反応度は1 \$に近接するものの、ドップラー反応度の挿入と圧力生成によるジャミングの解消を考慮することによってエネルギー発生は抑制される。すなわち、従来の60万kWe炉心に対するSAS4Aコードによる解析結果を大きく変えるものではない。
3. 本ジャミングモデルは、オリジナルモデルが有していた燃料分散に関する非保守性を解決した。しかし特に以下の点でモデル上の改善の余地がある。

—チャンク径の決定方法

—ジャミングの破壊のモデル（既存試験情報の収集を含む）

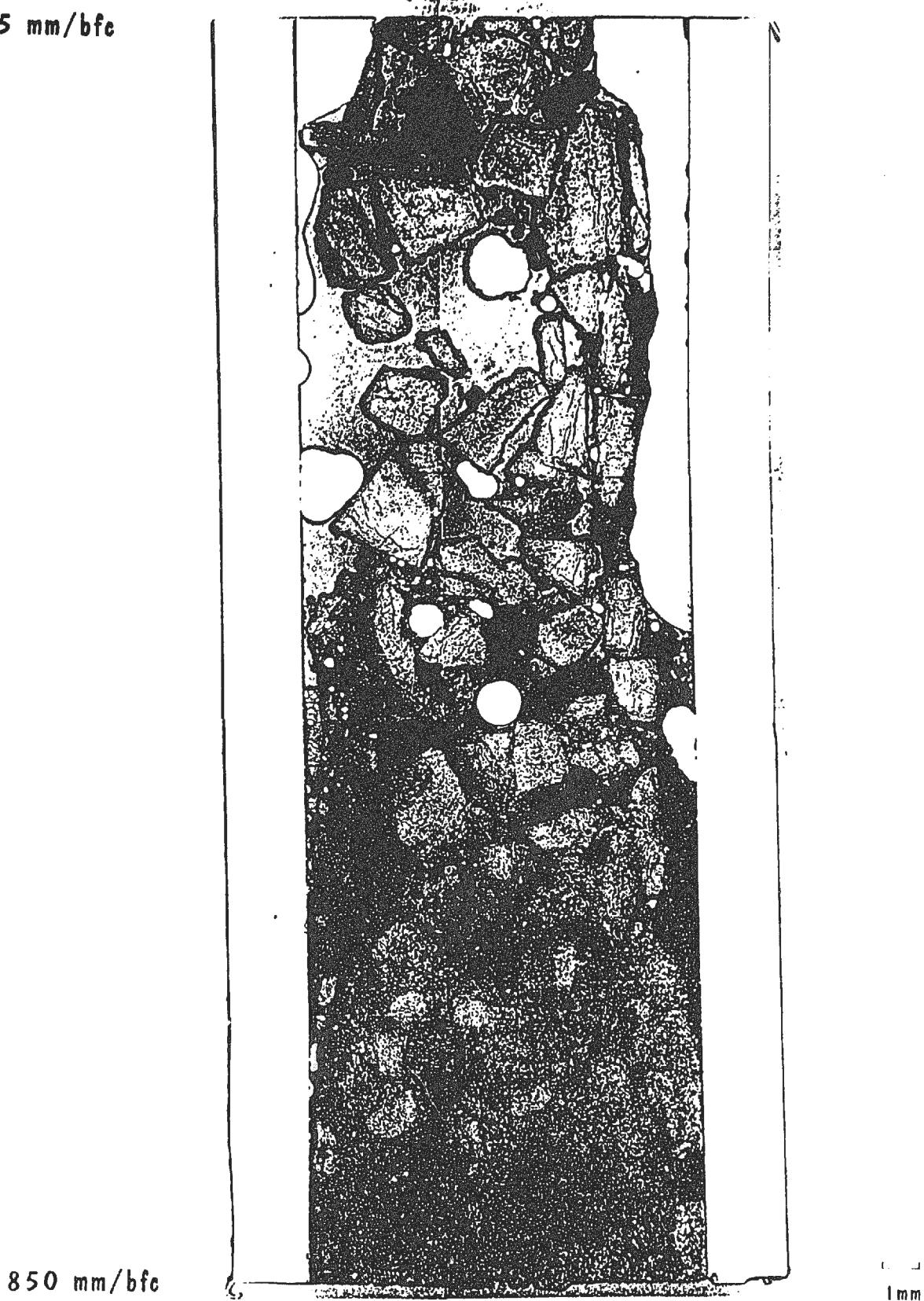
—ジャミング破壊後の再ジャミングモデル

3については、さらにこれらを支援するための炉外、炉内安全性試験の検討も、既存施設（特にCABRI）、新規施設を含めて検討して行く予定である。

#### 4 結 論

1. CABRI炉内安全性試験における、実機の現実的挙動を模擬した比較的緩やかなエネルギー投入条件の試験におけるの金相写真結果より、以下の重要な結果が得られた。
  - 溶融燃料流の中には1～2 mmの大きさの固体片（チャンク）が存在する。
  - そのチャンクはFPガスのスウェーリングによる密度低下が見られた。
  - フィッサイル燃料の軸方向端部においては燃料ペレットがクラックに沿って崩壊したと考えられる2～3 mmの大きなチャンクが存在し、これが流路閉塞を生じさせて燃料の流出を阻害している。
2. 上記の知見をFBR安全解析コードSAS4Aの物質移動モデルLEVITATEのモデル改良に反映した。
3. CABRI試験結果を用いた検証解析を通して、本チャンクモデルの改良によって物質移動挙動、特に流出と固化挙動の模擬が改善されることが示された。
4. 60万kWeクラス実炉への適用解析の結果、これまで見られていたバースト後の燃料の非現実的な流出が抑制された。これによって従来の非保守的モデルによる解析結果はやや上方へ変化するものの、燃料流出の抑制による炉心圧力の上昇によって閉塞が破壊されることを考慮するモデルを導入したところ、大きな差異は生じないことが確認された。
5. 以上のモデル改良によって、これまでの物質移動モデルにおけるSAS4Aの非保守性が改善され、実機解析へ適用することが可能であるとの見通しを得た。

885 mm/bfc



CABRI test E13, AC2 located between level 850 and 885 mm/bfc

Fig. 1.2.1 E13 フィッサイル頂部の金相写真

## 参考文献

- (1) 上滝具貞、「粉粒体の空気輸送 新版」日刊工業新聞社、1974年
- (2) 藤田重文、東畠平一郎、「化学工学Ⅱ 第2版」東京化学同人、1972年
- (3) Langmaid, R. N. and Rose, H. E., "Arch Formation in a Non-cohesive Granular Material,"  
*Journal of Institute of Fuel*, 166, April, 1957
- (4) 前田、林、丹羽、他、「平成4年度下期大型高速炉設計研究 一成果報告会資料集一」、PNC PN9440 93-010、1993年6月

## 第 II 部

# Improvement of the Chunk Flow and Freezing Model

4th SAS4A Specialist Meeting  
October 6-8, 1993  
KfK, Germany

H. Niwa  
O-arai Engineering Center, PNC

## Contents

1. Improvement of the Basic Modeling
  - 1.1 Drag Term between Chunks and Gas Mixture
  - 1.2 Wall Friction Term
  - 1.3 Chunk Size at Disruption
2. Improvement of the Jamming Model
  - 2.1 Maximum Volume Fraction of the Chunk
  - 2.2 Jamming by Large Chunks
  - 2.3 Jamming at Contraction Point
  - 2.4 Jamming of Low-enthalpy Chunk
  - 2.5 Breakup of Jamming
  - 2.6 Summary
3. Improvement of the Freezing Model
  - 3.1 Crust and Chunk Formation Consistent with Energy Transfer
  - 3.2 Freezing of Fuel and Steel at the Edge Node
4. Model verification (using CABRI-II E13)
5. Concluding Remarks

## 1. Improvement of the Basic Model

### 1.1 Drag Term between Chunks and Gas Mixture

If the volume fraction of chunk is large compared with that of molten fuel/steel (continuous phase), direct interaction between chunks and gas mixture should be considered also in bubbly flow regime.

#### - Original model (Bubbly Flow regime)

Chunk and gas mixture:

$$\Gamma_{Mo,Mi,i}^{drag\ chunk} = C_{D,Mi,lu,i} ( u_{lu,i}^{n+1} - u_{Mi,i}^{n+1} ) | u_{lu,i} - u_{Mi,i} | \quad (8.4-154)$$

$$C_{D,Mi,lu,i} = \theta_{lu,i} \rho_{Mi,i} CIA7 \frac{1}{R_{lu,i}} \left( \frac{\theta_{Mi,i}}{\theta_{ch,i}} \right)^{CIA5} C_{Drag} C_{Area,Mi,lu,i} \quad (8.4-155)$$

where,

$C_{Area,mi,lu,i} = 1 - F_{Area,bd,lu,i}$  : fraction of the lateral chunk area in contact with the gas mixture

Drag term between molten fuel/steel and chunk (bubbly flow)

Chunk and molten fuel:

$$\Gamma_{Mo,fu,i}^{drag\ chunk} = C_{D,fu,lu,i} ( u_{lu,i}^{n+1} - u_{fu,i}^{n+1} ) | u_{lu,i} - u_{fu,i} | \quad (8.4-181)$$

$$C_{D,fu,i,lu,i} = \theta_{lu,i} \rho_{fu,i} CIA7 \frac{1}{R_{lu,i}} \left( \frac{\theta_{chop} - \theta_{lu,i}}{\theta_{chop}} \right)^{CIA5} C_{Drag} C_{Area,fu,lu,i} \quad (8.4-183) \text{ mod. based on the source program of LEFRLU.}$$

$C_{Area,mi,lu,i} = 0$  : no drag effect is considered between chunk and gas mixture

$C_{Area,fu,lu,i} = 1.0$  : drag effect is fully considered between chunk and molten fuel (or steel)

#### - Improved Model

Temporary modification (only in bubbly flow regime)

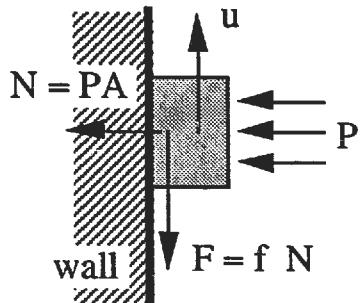
$$C_{Area,mi,lu,i} = \frac{\theta_{Mi,i}}{\theta_{Mi,i} + \theta_{fu,i} + \theta_{se,i}}$$

$$C_{Area,fu,lu,i} = \frac{\theta_{fu,i} + \theta_{se,i}}{\theta_{Mi,i} + \theta_{fu,i} + \theta_{se,i}}$$

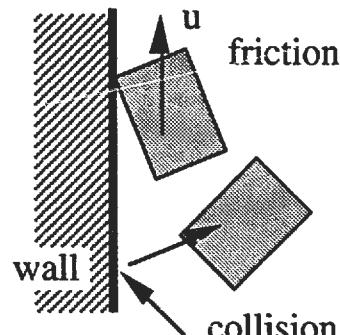
## 1.2 Wall Friction Term

### - Original Model :

Only normal friction force is considered.



original model



realistic interaction  
between chunks and wall

No friction in bubbly flow regime because chunks are considered to be suspended in the molten fuel/steel phase.

### - Improved Model

Friction should be considered even in bubbly flow regime as follows:

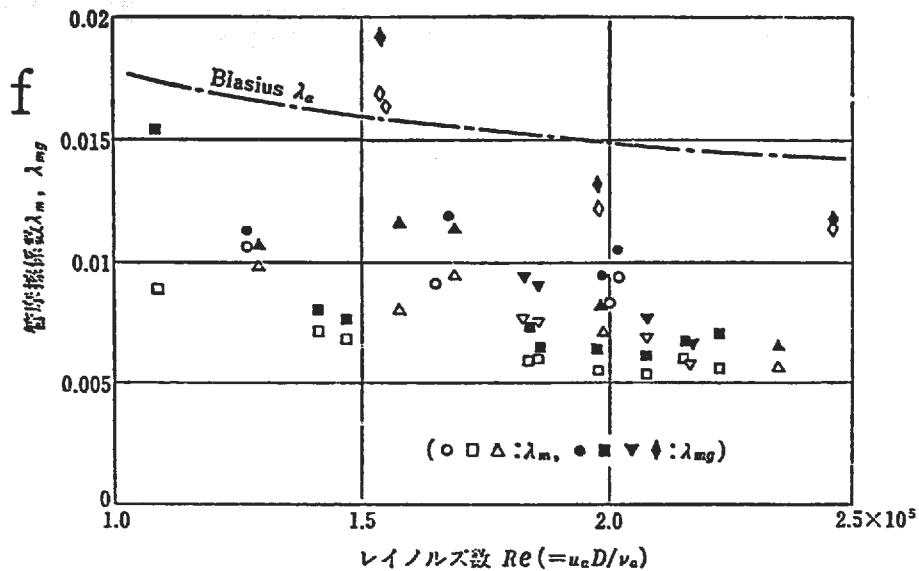
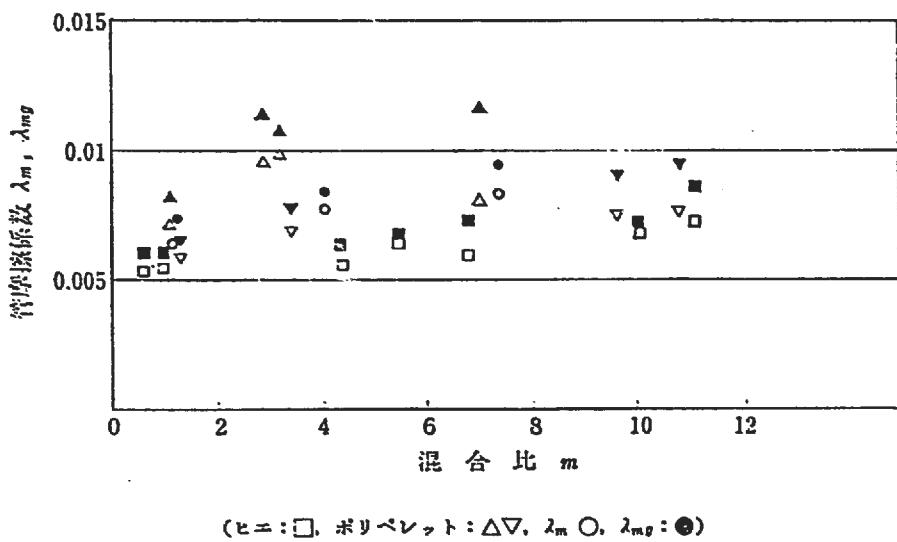
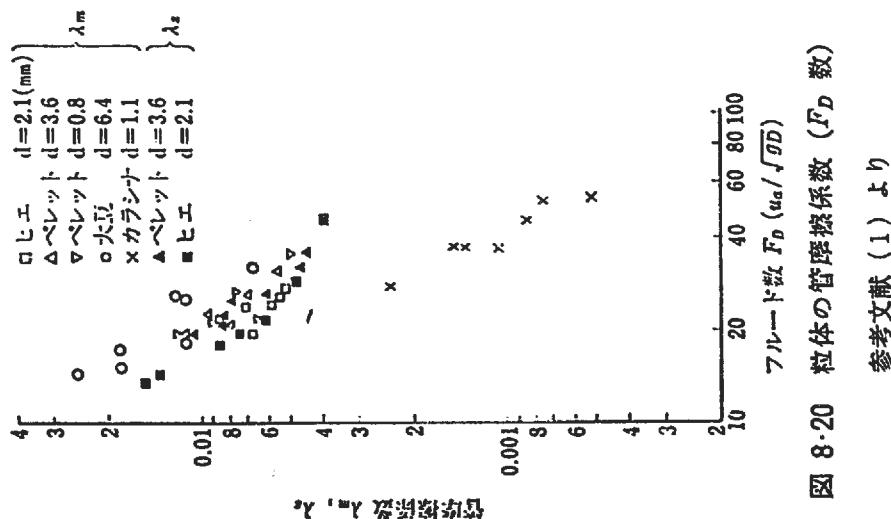
$$\Gamma_{Mo,lu,i}^{\text{friction wall}} = - f_{lu,i} \frac{\rho'_{lu,i}}{2 D_H} (u_{lu,i} + \Delta u_{lu,i}) |u_{lu,i}|$$

$f_{lu,i}$  : friction coefficient of the chunks and the wall

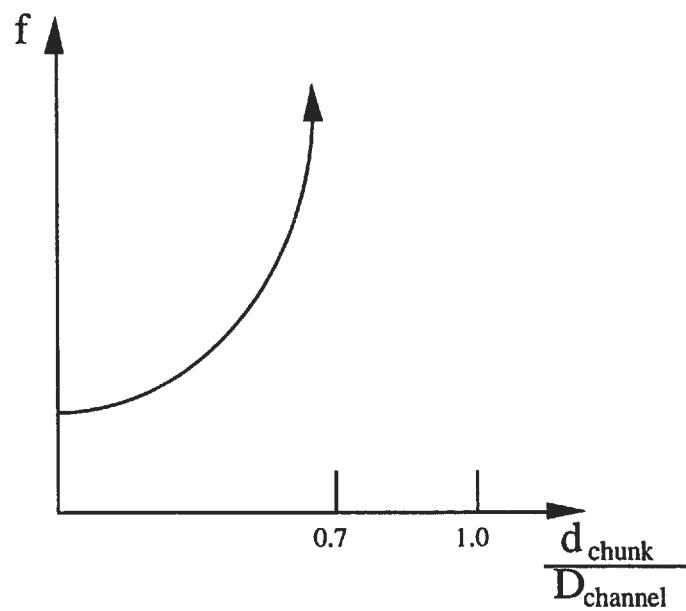
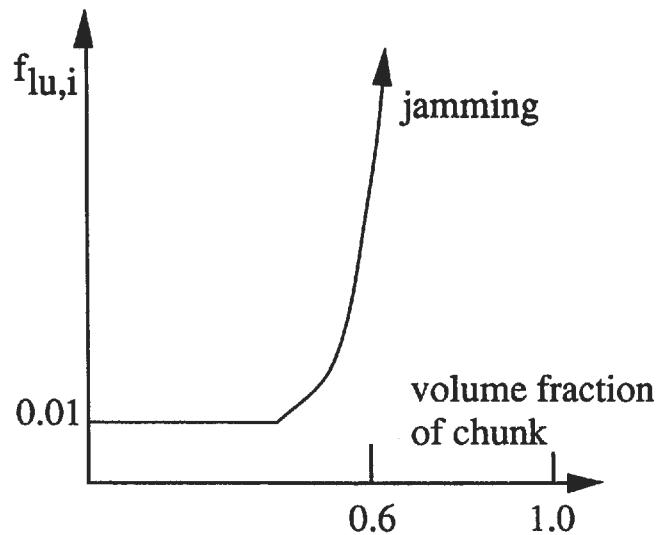
This is measured for dry grains and steady flow  
(  $f_{lu,i} \approx 0.01$  ).

See Figures.

- The value of  $f_{lu,i}$  becomes higher;
  - if the volume fraction of chunk is large,
  - if the surface of the piping is rough,
  - if the surface of the chunk or piping is wet,
  - if the chunk is accelerated (static friction coefficient is valid).

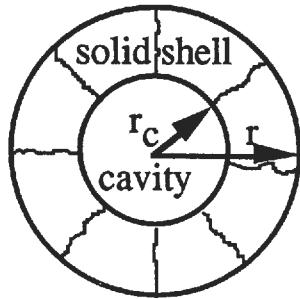
(大豆: ◇, ヒニ: □, ポリベレット: △▽,  $\lambda_m$ : ●,  $\lambda_{mg}$ : ◉)図 8-18  $\lambda_m$ ,  $\lambda_{mg}$ , の  $u_a$  による変化 参考文献 (1) より(ヒニ: □, ポリベレット: △▽,  $\lambda_m$ : ●,  $\lambda_{mg}$ : ◉)図 8-19  $\lambda_m$ ,  $\lambda_{mg}$  の  $m$  による変化 参考文献 (1) より図 8-20 フルード数  $F_D (= u_a / \sqrt{gD})$  と粒体の管摩擦係数 ( $F_D$  数)  
参考文献 (1) より

- The value of  $f_{lu,i}$  becomes higher if collision probability increases or free rotation of each chunk is disturbed. It may increase with higher volume fraction of chunks.



### 1.3 Chunk Size at Disruption

The diameter of chunks at disruption could be related to the size of the solid shell at the disruption node.



1. If one keeps the thickness of the solid shell, one obtains,

$$d_{\text{chunk}}^{\text{disruption}} = r_{\text{pellet}} - r_{\text{cavity}} .$$

2. If one keeps the cross sectional area of the solid shell which is cracked into 8 pieces, one obtains,

$$\text{area} = \frac{1}{8} \pi (r_{\text{pellet}}^2 - r_{\text{cavity}}^2) = \pi (r_{\text{chunk}}^{\text{dis}})^2$$

$$\therefore r_{\text{chunk}}^{\text{dis}} = \sqrt{\frac{1}{8} (r_{\text{pellet}}^2 - r_{\text{cavity}}^2)} .$$

Original model is based on a similar idea, but gives larger radius than the above model.

$$\begin{aligned} r_{\text{chunk}}^{\text{dis, ori}} &= \sqrt{(r_{\text{pellet}} - r_{\text{cavity}}) \Delta L} \\ &= \sqrt{(r_{\text{pellet}} - r_{\text{cavity}}) (2\pi r_{\text{pellet}}/8)} . \end{aligned}$$

If RALUDI (input) is given, chunk radius is fixed to RALUDI.

## 2. Improvement of the Jamming Model

### 2.1 Maximum Volume Fraction of the Chunks

#### REGULAR PACKING

(like a crystal lattice arrangement)

Uniform Spheres

There are theoretically 6 stable configurations of packing.

porosity : from 47.64 % to 25.95 %

Uniform spheres and inscribed smaller spheres (2 sizes)

There are theoretically 9 stable configurations of packing.

porosity : from 27.10 % to 20.7 %

#### RANDOM PACKING

Uniform Spheres

Experimental data shows that the porosity of randomly packed uniform spheres is about 40 to 45 %.

See Figures.

**Therefore, a realistic upper limit of the chunk's volume fraction is about 60 %.**

porosity

Regular  
Packing  
(uniform size)

表 1・3 均一球粒子の規則充てん形式 参考文献（2）より

	接触点数 (配位数) $k[-]$	空げき率 $\epsilon[\%]$	$\theta_1$	$\theta_2$ [°]	$\theta_3$	充てん形式
正方系	(a) 6	47.64	90	90	90	立方体充てん (cubic)
	(b) 8	39.54	90	90	60	正斜方充てん (orthorhombic)
	(c) 12	25.95	90	60	60	菱面体充てん (rhombohedral)
六方系	(d) 8	39.54	90	60	90	正斜方充てん (tetragonal sphenoidal)
	(e) 10	30.19	60	60	75°31'	
	(f) 12	25.95	60	60	60	菱面体充てん

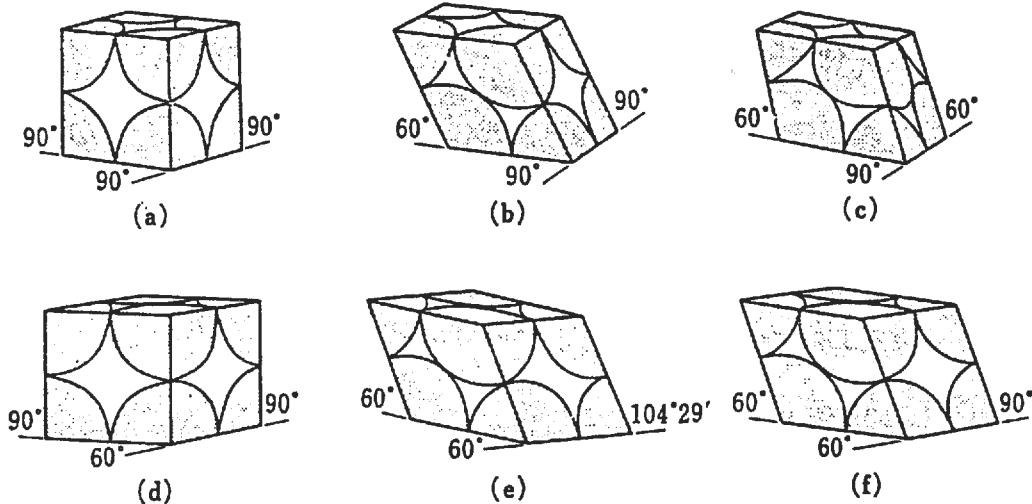


図 1・43 球状粒子の充てんの仕方 6 種 参考文献（2）より

表 1・4 高次球の規則充てん 参考文献（2）より

	次 order	半 径	個 数	空 け き 率 $\epsilon [\%]$
立方体充てん	1	$r_1$	1	47.64
	2	$0.732 r_1$	1	27.10
	3	$0.286 r_1$	3	23.43
正斜方充てん	1	$r_1$	1	39.54
	2	$0.5275 r_1$	2	21.79
	3	$0.189 r_1$	4	20.16
菱面体充てん	1	$r_1$	1	25.95
	2	$0.414 r_1$	1	20.7
	3	$0.225 r_1$	2	19.0

regular  
packing  
(higher order)

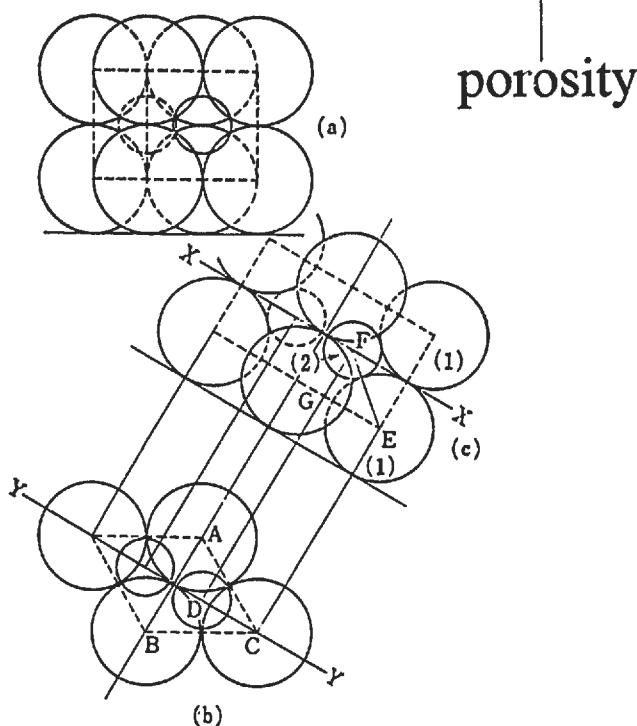


図 1・45 正斜方充てんにおける 2 次球 参考文献（2）より

random packing

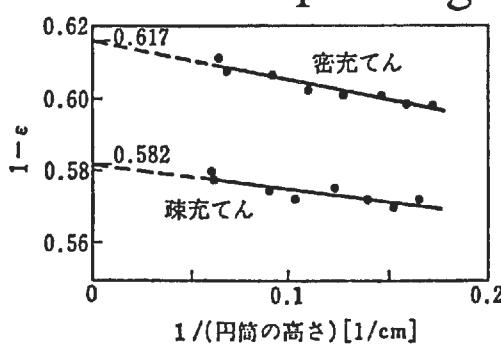


図 1・47 層高の影響

column height

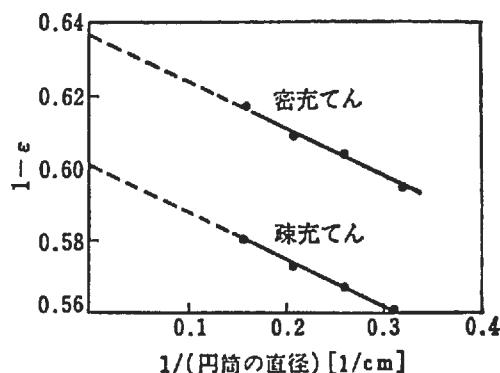
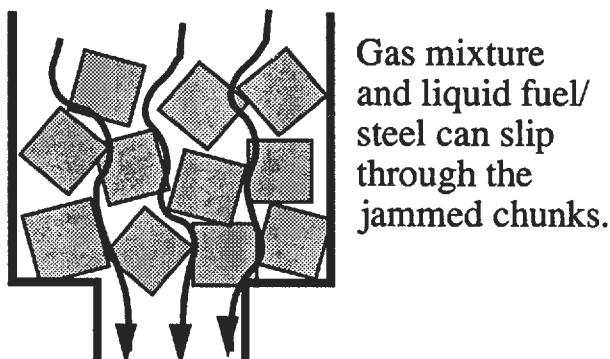


図 1・48 容器径の影響 参考文献（2）より

diameter

## Modelling

- If the volume fraction of the chunks exceeds the maximum value, 0.6, no more chunks can enter into this cell.
- Although the volume fraction of the chunks exceeds 0.6, molten fuel/steel, and gas mixture can penetrate into this cell.
- Even if chunk jamming takes place, gas mixture and liquid fuel/steel can penetrate through the jamming region though losing much momentum and energy. It is also possible to occur that fuel flow changes to steel flow by losing fuel mass by freezing (freezing out mainly to chunk, not to crust). This can be simulated by the three velocity model of LEVITATE.

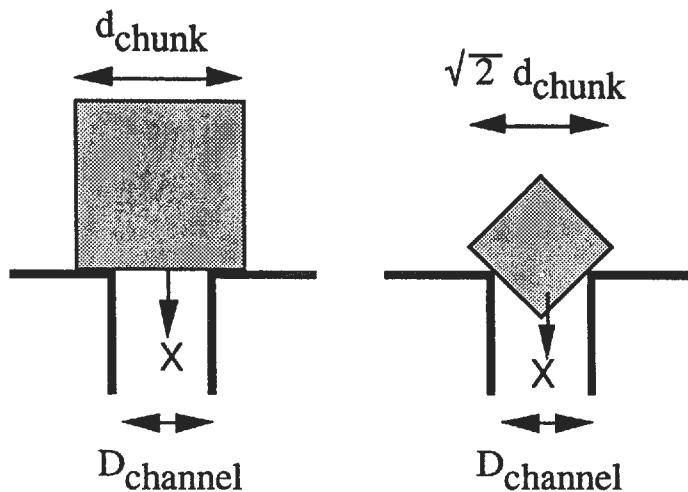


## 2.2 Jamming by Large Chunks

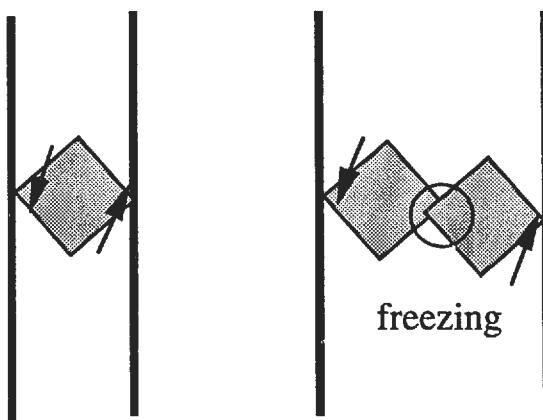
If the chunk size is comparable with the channel size, chunks are likely to jam.

$D_{\text{channel}} \leq d_{\text{chunk}}$  impossible to enter!

$D_{\text{channel}} \leq \sqrt{2} \cdot d_{\text{chunk}}$  impossible to enter!



- If a chunk cannot rotate freely, it can jam.
- If two ( or more ) chunks coalesce each other by freezing, an effective chunk size becomes larger and jamming occurs. (But it is easily broken.)

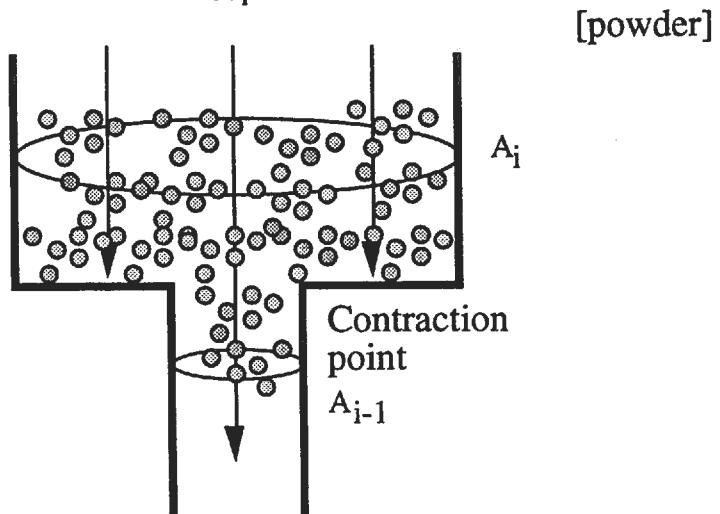


## 2.3 Jamming at Contraction Point

- Original Model :  $D_{\text{channel}} \gg d_{\text{chunk}}$  is implicitly assumed.

Momentum is lost depending on the ratio of channel area reduction.

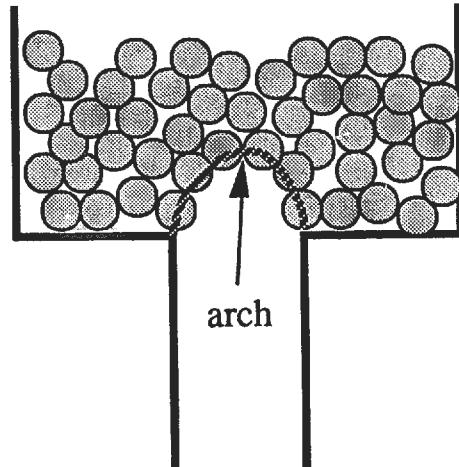
$$\text{ratio of momentum loss} = 1 - \frac{A_{i-1}}{A_i}$$



- Improved Model

$$D_{\text{channel}} > \approx d_{\text{chunk}}$$

If the chunk size is comparable with the diameter or the size of the outlet flow channel, chunks form "an arch" (or "a dome") at the exit and jam.



**The critical size of jamming is experimentally measured for dry grains (Langmaid, R. N. and H. E. Rose, "Arch formation in a Non-cohesive Granular Material," Journal of the Institute of Fuel, 166 (April 1957)).**

If the shape of the outlet is a circle, the critical diameter of forming a dome and jamming is,

$$D_{\text{crit}}^{\text{jam}} = 8.172 r_{\text{chunk}} = 4.1 d_{\text{chunk}}, \text{ or } d_{\text{chunk}}^{\text{jam}} = 0.24 D_{\text{channel}}.$$

If the shape of the outlet is a slit, the critical width of forming an arch and jamming is,

$$w_{\text{crit}}^{\text{jam}} = 5.512 r_{\text{chunk}} = 2.8 d_{\text{chunk}}, \text{ or } d_{\text{chunk}}^{\text{jam}} = 0.36 w_{\text{channel}}.$$

## Jamming at Contraction Point

Half arch case and full arch case could be considered depending on the channel geometry.

### Half arch case:

If one wall is straight, then a full arch (or dome) cannot be formed. A half arch (or half dome) could be formed if

$$D_{ch}^{in} - D_{ch}^{out} \geq \frac{1}{2} d_{chunk},$$

and the channel size is smaller than the critical size as follows:

$$D_{ch}^{out} < \frac{1}{2} D_{crit}^{jam} = 2.1 d_{chunk}, \text{ or } d_{chunk}^{jam} > 0.5 D_{ch}^{out} \text{ (circle)}$$

$$D_{ch}^{out} < \frac{1}{2} w_{crit}^{jam} = 1.4 d_{chunk}, \text{ or } d_{chunk}^{jam} > 0.71 D_{ch}^{out} \text{ (slit).}$$

### Full arch case:

If both walls are not straight, a full arch or full dome could be formed if

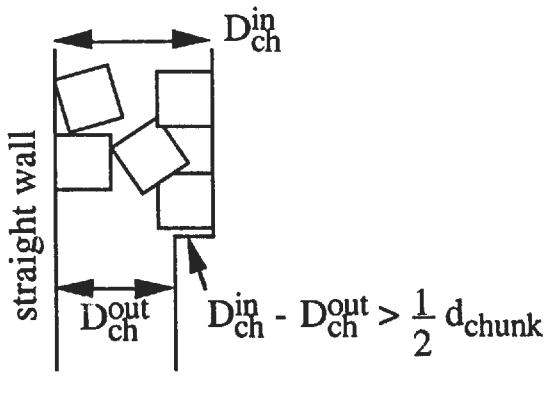
$$D_{ch}^{in} - D_{ch}^{out} \geq d_{chunk},$$

and the channel size is smaller than the critical size as follows:

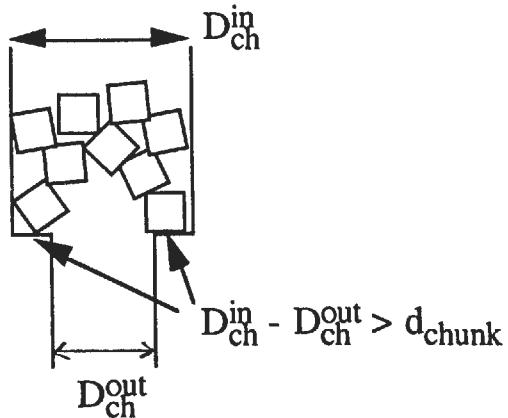
$$D_{ch}^{out} < D_{crit}^{jam} = 4.1 d_{chunk}, \text{ or } d_{chunk}^{jam} > 0.24 D_{ch}^{out} \text{ (circle)}$$

$$D_{ch}^{out} < w_{crit}^{jam} = 2.8 d_{chunk}, \text{ or } d_{chunk}^{jam} > 0.36 D_{ch}^{out} \text{ (slit).}$$

half arch case



full arch case



## Relating to the hydraulic diameter

If the channel size, or effective diameter or width of the channel, can be related to the hydraulic diameter, critical chunk size can be calculated from the hydraulic diameter using above correlations.

### Single pin geometry:

Pin region: The shape of the channel is like a slit.

The width of the channel at the intact pellet region is just half of DH.

$$D_{ch} = \frac{1}{2} D_H$$

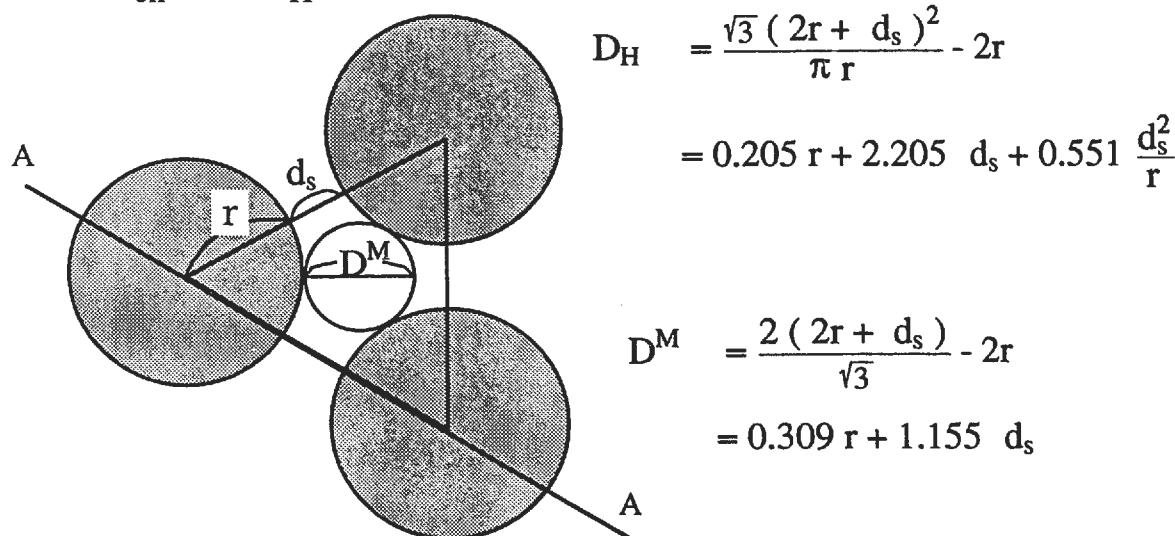
Disrupted region:

$$D_{ch} = D_H$$

### Bundle geometry

Pin region: The diameter of the inscribed circle surrounded by three neighbouring fuel pins is about  $0.7 D_H$ .

$$D_{ch} = 0.7 D_H$$



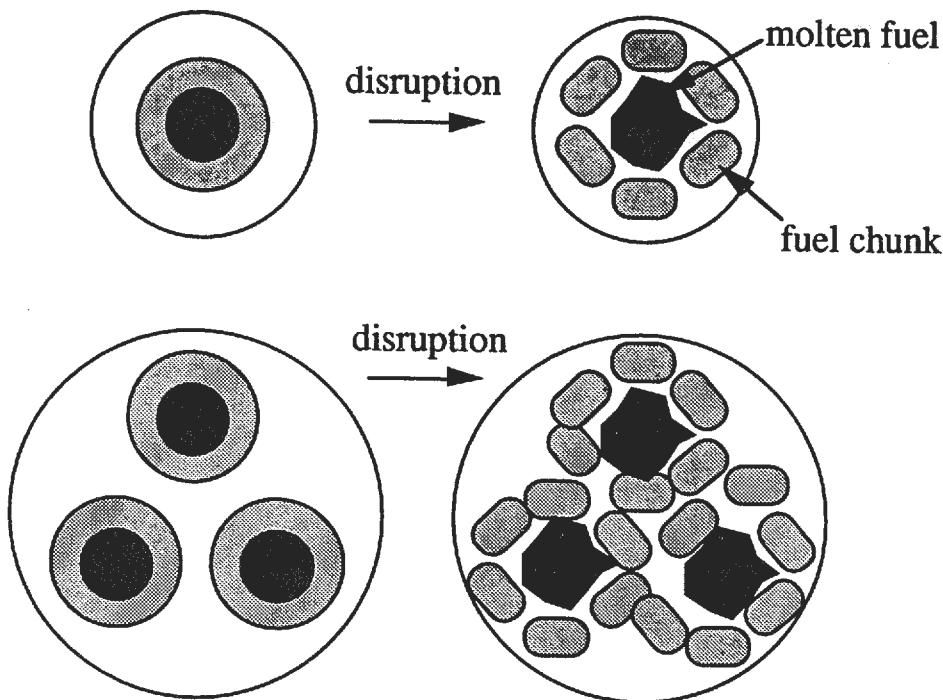
fuel pin	$r$ [mm]	$d_s$ [mm]	$DH$ [mm]	$DM$ [mm]	$DM/DH$ [mm]	$d_{chunk}^{jam}$ [mm]
Viggen-4 type	3.275	1	3	2.2	0.73	0.538
large scale reactor	4.25	1.2	3.7	2.7	0.73	0.661

Disrupted region:

$$D_{ch} = D_H \quad (D_H \text{ is about } 10 \text{ to } 20 \text{ cm})$$

## 2.4 Jamming of Low-enthalpy Chunk

Difference of chunk distribution at disruption between dundle- and single pin- geometry should be taken into account.



In a single pin geometry, chunks are separated from the molten fuel at disruption, therefore wall friction effect is dominant in chunk flow.

On the other hand, in a bundle geometry, most of the chunks are mixed with molten fuel at disruption, though some chunks exist at the periphery.

This situation means that a 2-dimensional model is needed to describe momentum and energy transfer in heterogeneous single pin geometry. (Single pin geometry is much more difficult than bundle geometry.)

Some considerations are needed at disruption in single pin geometry:

- Friction coefficient is larger in a single pin geometry because of strong heterogeneous distribution (like "a chunk annular flow"), or 2-D ( $r-z$ ) model is needed.
- Direct contact of molten fuel and wall is limited at disruption.

Therefore, low-enthalpy chunk would not move easily in single pin geometry.

## **2.5 Breakup of Jamming**

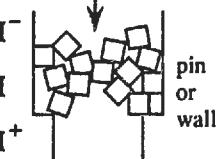
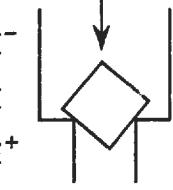
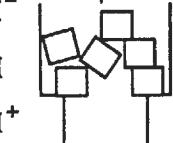
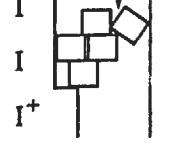
**If a high pressure is applied onto the jamming point, the arch could be destroyed.**

**This must also be modelled within jamming model, otherwise unrealistic jamming would be maintained.**

## 2.6 Summary

### Framework of the New Jamming Model

( $\theta_{lu}$ : volume fraction of the chunk)

mode	illustration	JAMMOD=1 (volume fraction model)	JAMMOD=2 (single pin model)	JAMMOD=3 (bundle model)	JAMMOD=4 (parametric model)
high volume fraction		If $\theta_{lu} \geq \theta_1$ (input), no flow from $I^-$ to $I$ ; and if $D_H(I^+) < D_H(I)$ , no flow from $I$ to $I^+$ .	←	←	←
a big chunk			If $d_{lu} > 0.71D_{ch}(I)$ or $d_{lu} > 0.71D_{ch}(I^+)$ or $d_{lu}(I^+) > D_{ch}(I^+)$ , no flow from $I$ to $I^+$ . In the pin region $D_{ch} = \frac{1}{2}D_H$ for JAMMOD=2 and 4, and $D_{ch} = 0.7D_H$ for JAMMOD=3. $D_{ch} = D_H$ in disrupted region.		
contraction ( $\theta_{lu} > 0.05$ )	A 		If $D_{ch}(I^+) < D_{ch} - d_{lu}$ If $I^+$ is pin region, $d_{lu} \geq 0.18D_H(I^+)$ If $I^+$ is disrupted region, $d_{lu} \geq 0.24D_H(I^+)$	pin region, $d_{lu} \geq 0.17D_H(I^+)$ disrupted region, $d_{lu} \geq 0.24D_H(I^+)$	pin region, $d_{lu} \geq C_j^1 D_H(I^+)$ disrupted region, $d_{lu} \geq C_j^3 D_H(I^+)$
	B 		If $D_{ch}(I) - d_{lu} \leq D_{ch}(I^+) \leq D_{ch}(I) - 0.5d_{lu}$ If $I^+$ is pin region, $d_{lu} \geq 0.35D_H(I^+)$ If $I^+$ is disrupted region, $d_{lu} \geq 0.50D_H(I^+)$	pin region, $d_{lu} \geq 0.35D_H(I^+)$ disrupted region, $d_{lu} \geq 0.50D_H(I^+)$	pin region, $d_{lu} \geq C_j^2 D_H(I^+)$ disrupted region, $d_{lu} \geq 2C_j^3 D_H(I^+)$
disruption at low enthalpy level		No motion in disrupted region until $e_{lu,f}$ exceed EGFUSO + $C_j^4$ (EGFULQ-EGFUSO) if $C_j^4 < 0.0$ , this mode is neglected.		←	←

Breakup of jamming due to high pressure difference is always considered.

( $I^-$  : upstream cell of  $I$ ,  $I^+$  : downstream cell of  $I$  )

### 3. Improvement of the Freezing Model

#### 3.1 Crust and Chunk Formation Consistent with Energy Transfer

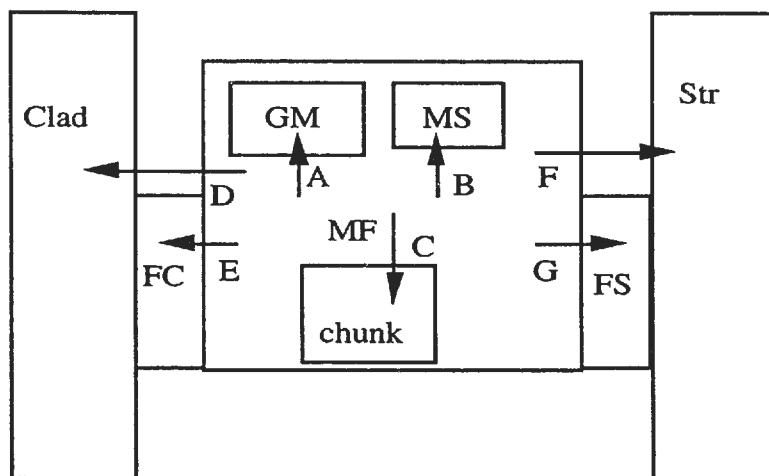
The amount of mass transfer (freezing) should be consistent with that of energy transfer.

##### - Original Model

Crust is firstly formed, then the residual frozen fuel added to chunk.

##### - Improved Model

The amount of mass transfer (freezing) should be consistent with that of energy transfer. For example, if heat transfer from molten fuel to molten steel is dominant, most amount of the frozen fuel should transferred to the chunk component (not to the crust component).



$$\Delta m_f^{\text{MF} \rightarrow \text{crust}} : \Delta m_f^{\text{MF} \rightarrow \text{chunk}} = (D + E + F + G) : (A + B + C)$$

### **3.2 Freezing of Fuel and Steel at the Edge Node**

#### **- Original Model**

Freezing of fuel and steel is not allowed in the edge node (at IFFUTP, IFFUBT, IFSETP, IFSEBT). Therefore the cold fuel and/or steel below its freezing condition goes to the fuel/steel chunk component.

Problem is that the chunks formed at the edge node can flow away, thus blockage is not formed. Non-conservative treatment.

#### **- Model improvement**

Freezing out of fuel and steel (crust formation) should be allowed even in the edge node.

#### 4. Model Verification (using CABRI-II E13)

In order to clarify the effect of each modeling, following cases were performed.

##### 1. BASE:

Fission gas model is used. TDGRLL=0.01 s, TDGRLS=0.1 s

Steel plate-out (steel crust formation) at the edge node is allowed.

FNMLET = 0.3 , EGBBLY = 1.084E6 [J/kg] in order to match FNMLET,

CIBBIN=0.7 , CIBBDI=0.2, RALUDI = 0.5 mm, RALUFZ = 0.5 mm,

Dh in the disrupted region is corrected. Failure time is given (TOP 300ms),  
no artificial adjustment

2. **DENSITY:** effective chunk density ( $RHFSIN=4000 \text{ kg/m}^3$ )
3. **SIZE:** initial chunk size at disruption is determined based on the cross sectional area of the solid fuel shell.  $RALUFZ = 0$
4. **FRICTION:** Blasius's type friction model ( $f = 3.0$ )
5. **DRAG :** drag term between chunk and gas mixture even in bubbly flow.
6. **FREEZING:** fuel freezing to chunk or crust is consistent with energy transfer
7. **STEEL FREEZE:** Steel plate-out (steel crust formation) at the edge node is not allowed (Original model is used, that is, all the frozen steel at edge node goes to chunk).
8. **JAM:** jamming model is used ( $JAMMOD=2$ )
9. **JAM2:**  $2 + 3 + 5$
10. **INTEGRATED:** 2 through 6

## Observations

**BASE** : Initial upward motion is overestimated compared with experiment. Downward motion from 500 to 700 ms is underestimated. In 800 ~ 1000 ms, downward motion seems OK but upward motion is overestimated. (Totally, non-conservative result)

**DENSITY** : Volume fraction of chunk fuel is increased thus chunk fuel occupies channel area (400 ms). Upward motion is slightly decreased (but difference is unclear).

**SIZE** : Effect of initial chunk size is not so clear (near to 0.5 mm). Effect of RALUFZ=0 is apparent at TFC. RALUCH is about 0.1 mm at TFC, thus molten fuel is cooled down, then switched to steel annular flow, and cooled down faster and forming chunks. Friction of the chunk limits the upward motion.

**FRICITION** : This model ( $f=3.0$ ) gives higher friction in bubbly flow while lower friction in annular flow than original model. Lower friction due to annular gives faster downward motion at ~400ms. From 500ms to 700 ms, slower motion in the bubbly flow region ( upper part of fissile) is apparent. After switching to annular flow at the edge part (top and bottom), lower friction gives farther penetration into blanket region.

**DRAG** : This model modification is used only in bubbly flow. There is no clear difference which one can give clear explanation.

**FREEZING** : Amount of fuel crust in the fissile region is apparently small. Fuel mass remaining in the center part is nearer to the experiment. At the edge part just above TFC, fuel crust is formed similarly with base case.

**STEEL FREEZE** : If one uses the original model, all the molten steel in UAB region becomes chunk (not steel crust) at LEVITATE initiation. Lower steel crust is not formed, though it was formed in the base case after 700 ms.

**JAM** : Initial upward motion ( $\sim 500$  ms) is reduced. Downward motion is jammed at 800 ms (half arch at contraction point), but it is released later due to melting of chunk (chunk radius is reduced). Lower part is conservative, while upper part is still non-conservative.

**JAM2** : Both upward and downward motion is apparently restricted. Jamming is occurred both at TFC and at the boundary of lower pin stub (1000 ms).

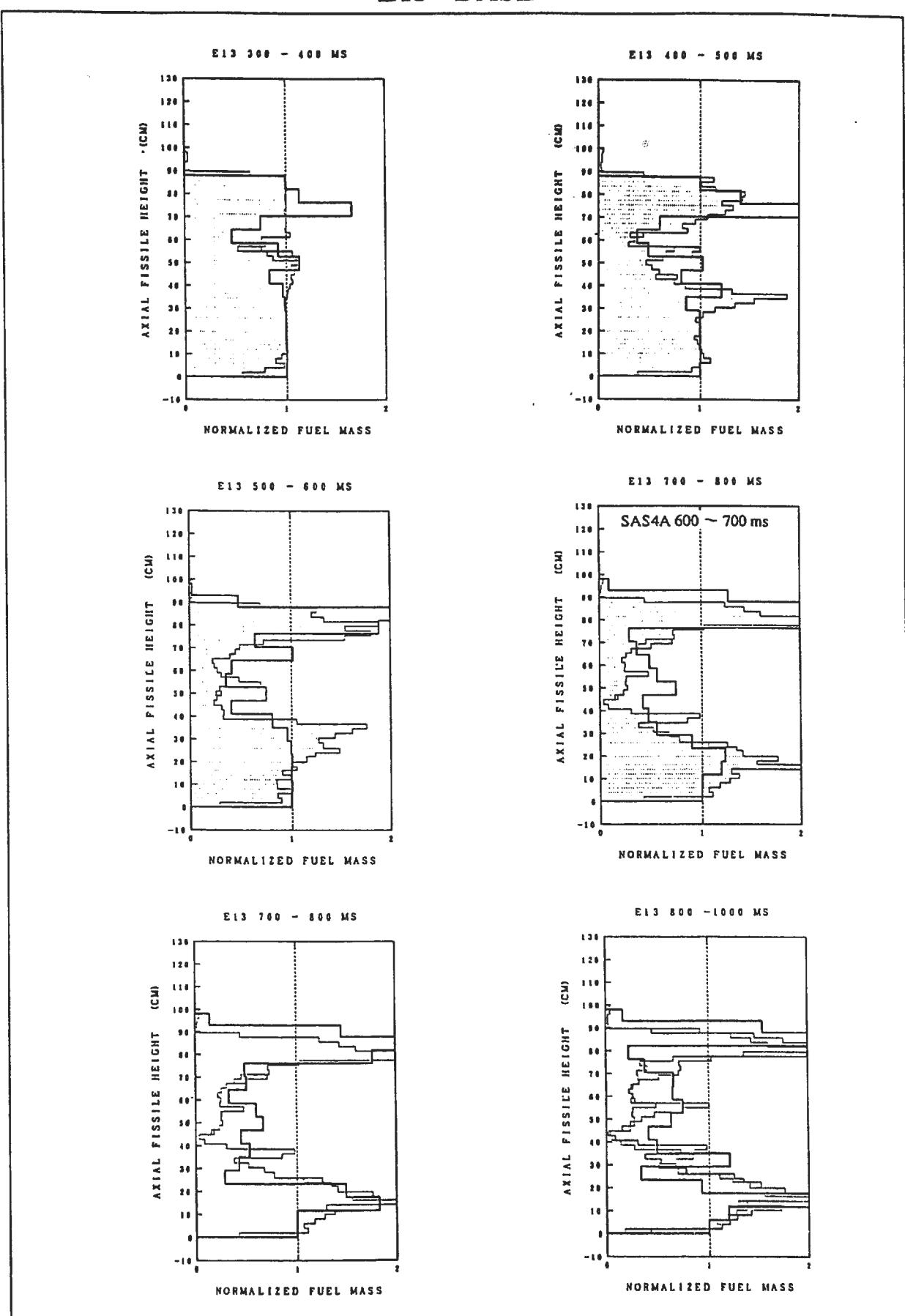
**INTEGRATED** : This case is JAM2 + FRICTION + FREEZING. Compared with JAM2, the amount of fuel crust is apparently small. Remaining fuel mass in the central part is less than JAM2. Jamming at lower part is similar to JAM2, but upward motion is faster due to lower friction in annular flow (after 500 ms). However, jamming at the top node just above TFC clearly suppresses penetration into the narrow channel. Compared with the base case, both upward and downward motions are reduced.

## 5. Concluding Remarks

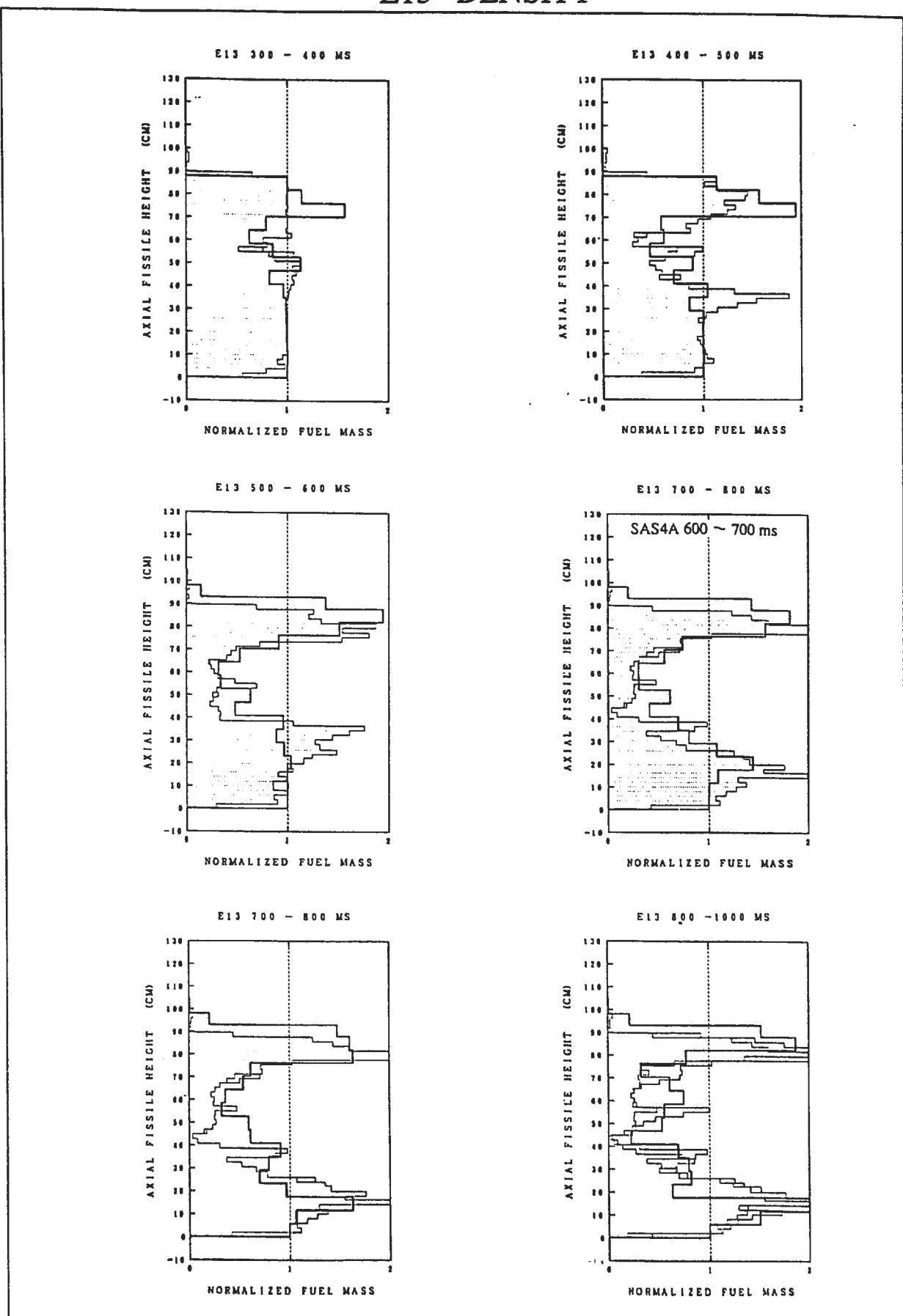
- 1. A framework of chunk jamming model has been established and introduced to SAS4A. Several related modifications were also proposed.**
- 2. Function of each elemental model has been confirmed through above calculations. Although the proposed jamming model is still crude one, obtained result seems adequate, or at least conservative than the original model.**
- 3. These modifications are concentrated on chunk flow model (momentum equation). However, above calculations show that effects coming from other modelings sometimes control the trend of material motion. Further refinement are necessary in:
  - local geometry problem  
chunk size, steel and fuel droplet size, bubble size
  - treatment of foamy fuel  
dynamics of dissolved gas release and bubble size  
effective fuel density?**

Consistency should be kept among mass, momentum and energy transfer models.

## E13 BASE



## E13 DENSITY

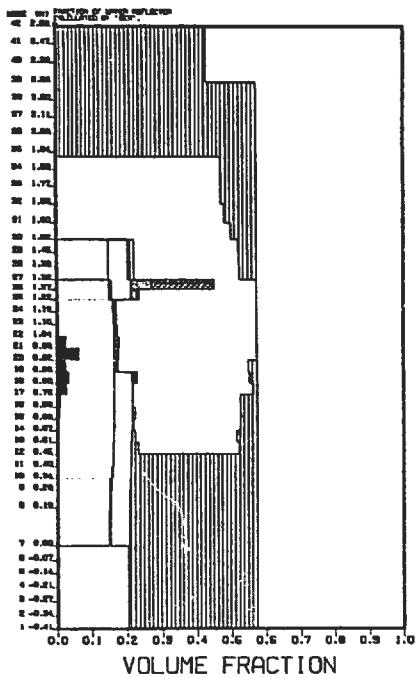


## E13 BASE

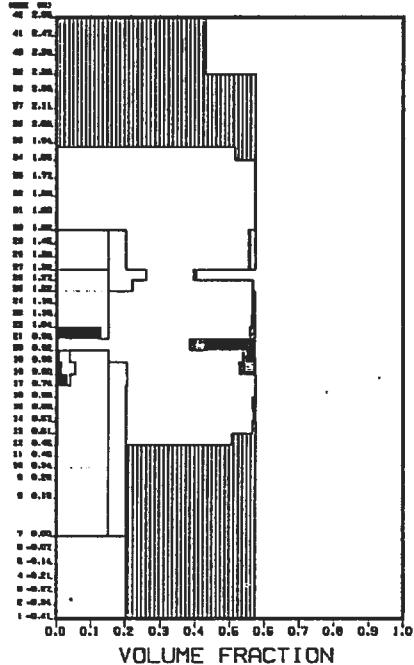
< LEGEND >

- COOLANT
- MOLTEN FUEL
- LIQUID FUEL
- CHUNK FUEL
- MOLTEN STEEL
- CHUNK STEEL

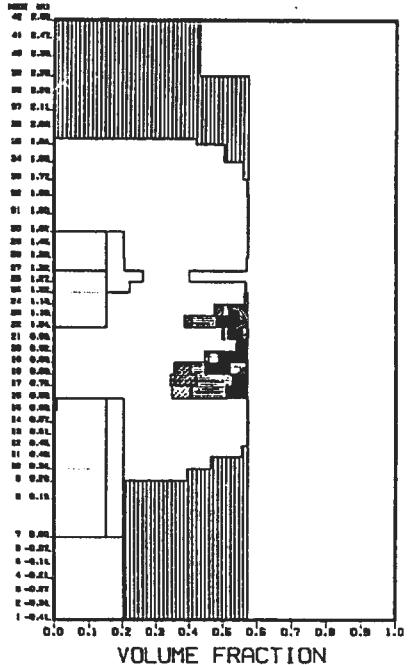
TOP 300 ms



TOP 301 ms

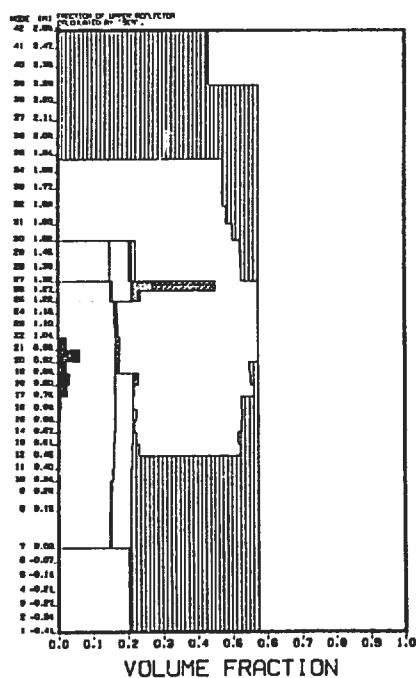


TOP 400 ms

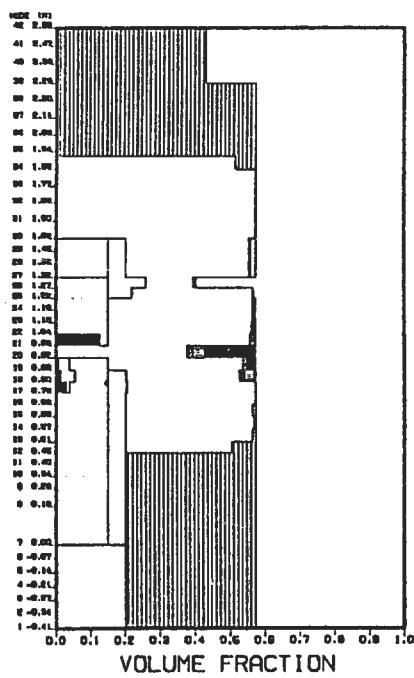


## E13 DENSITY

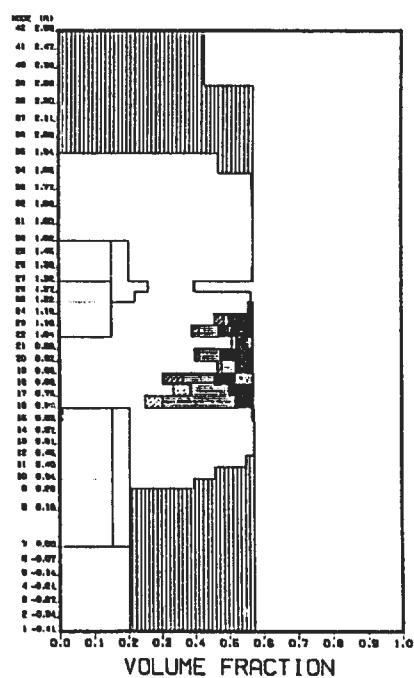
TOP 300 ms



TOP 301 ms

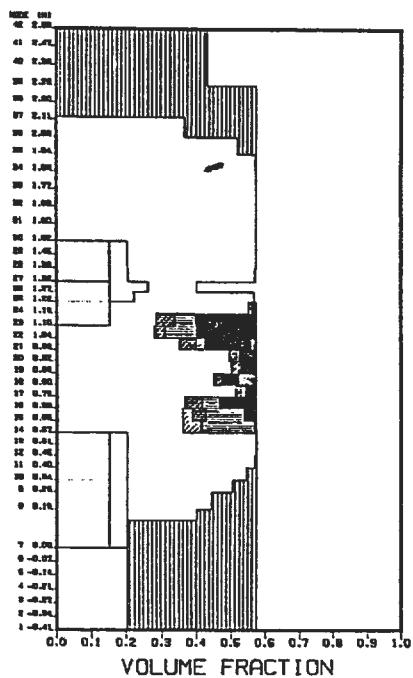


TOP 400 ms

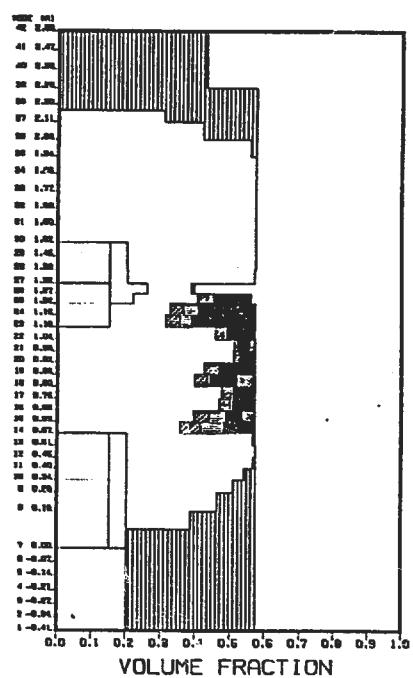


E13 BASE

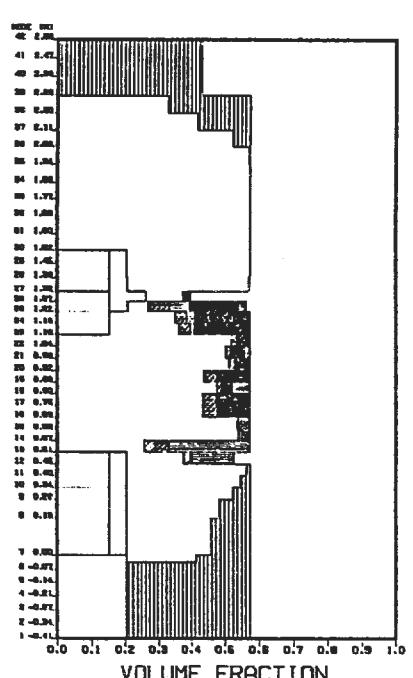
TOP 500 ms



TOP 600 ms

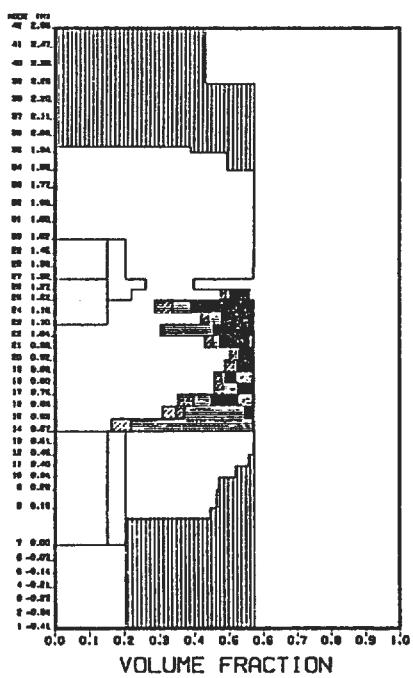


TOP 700 ms

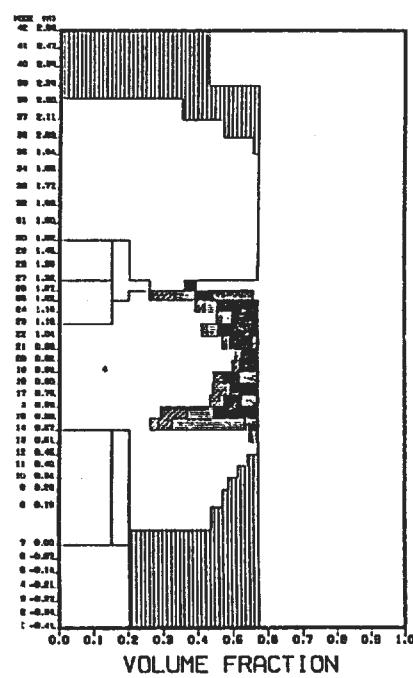


E13 DENSITY

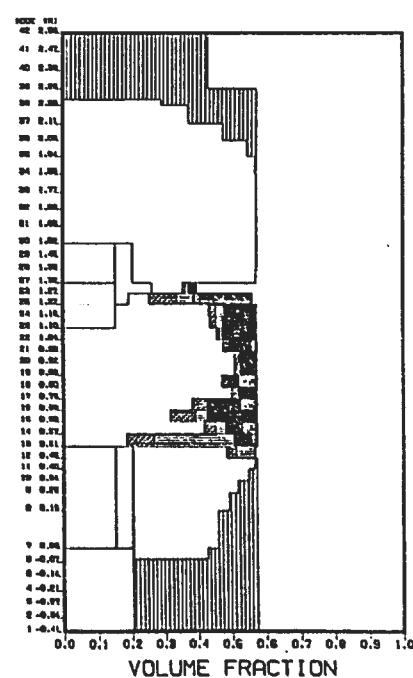
TOP 500 ms



TOP 600 ms

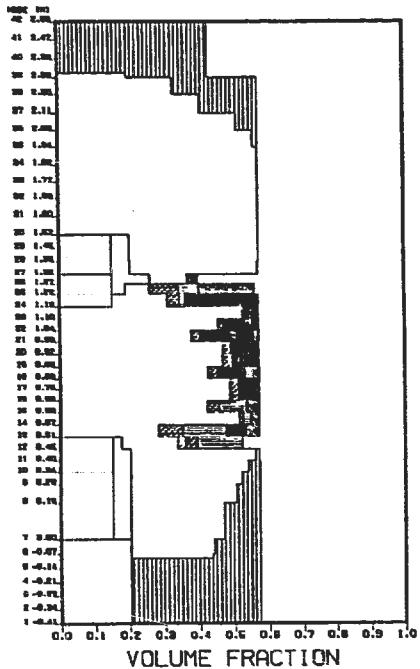


TOP 700 ms

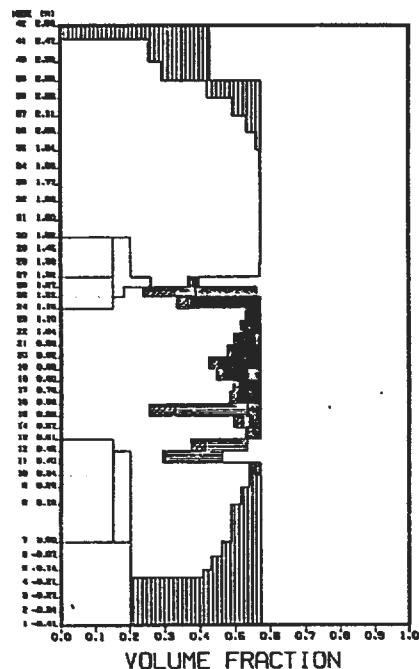


E13 BASE

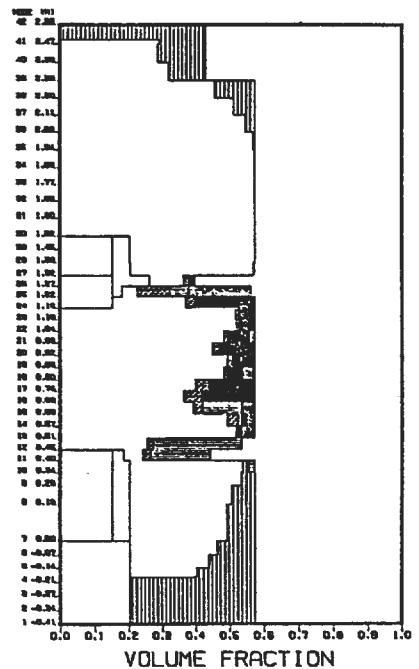
TOP 800 ms



TOP 900 ms

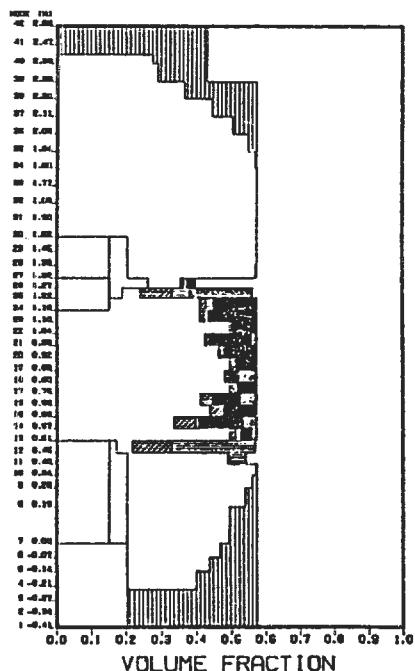


TOP 1000 ms

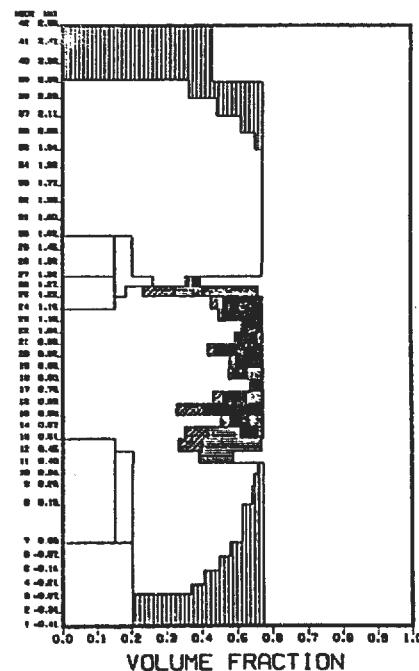


E13 DENSITY

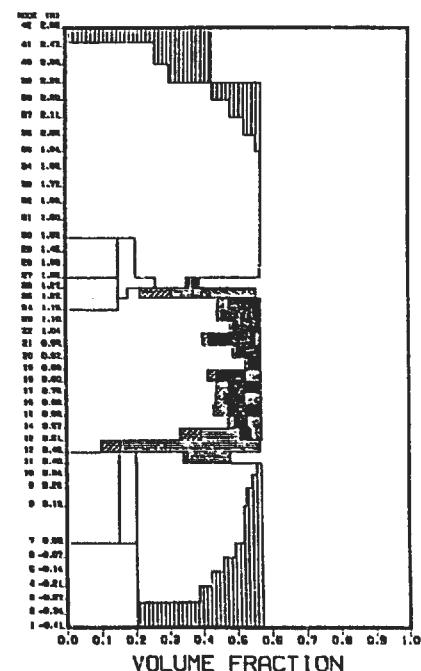
TOP 800 ms



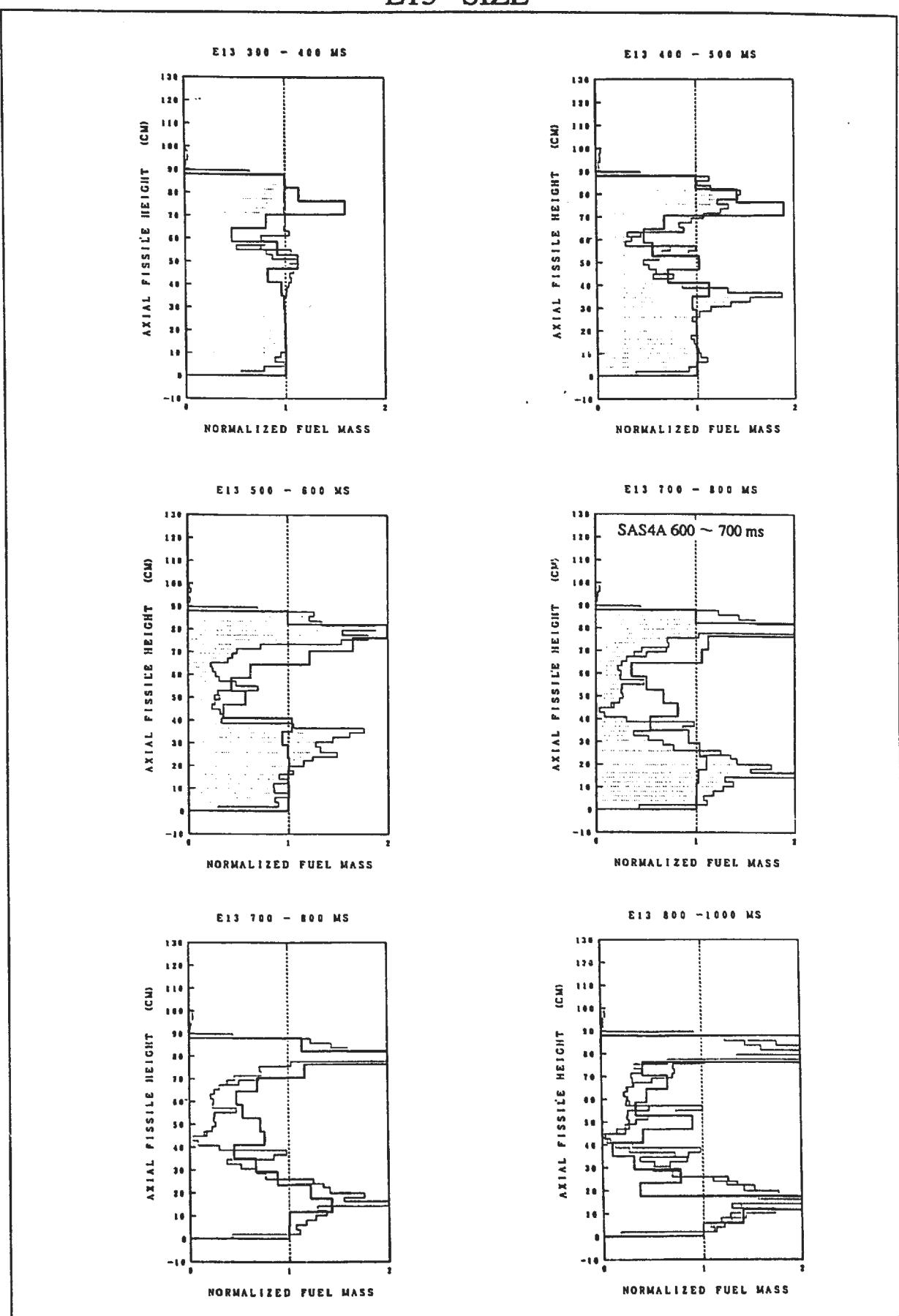
TOP 900 ms



TOP 1000 ms



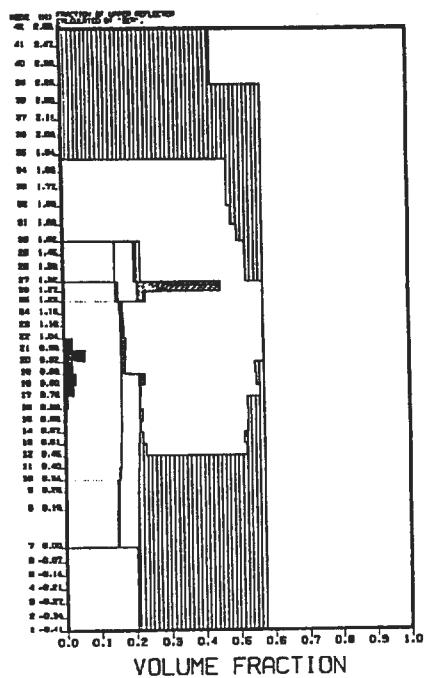
## E13 SIZE



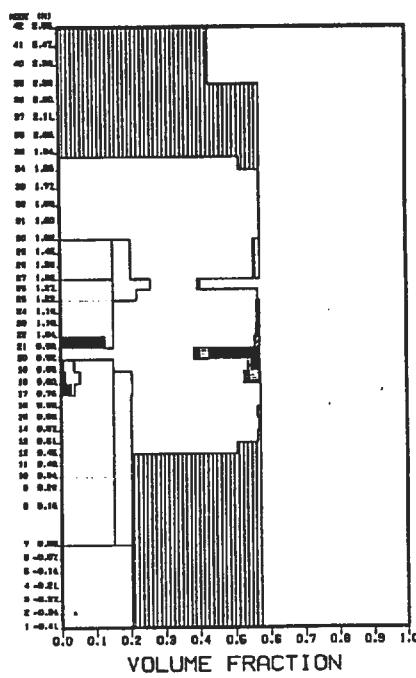
## E13 BASE

< LEGEND >  
 COOLANT  
 MOLTEN FUEL  
 REFRACTORY FUEL  
 MOLTEN STEEL  
 CHOK STEEL

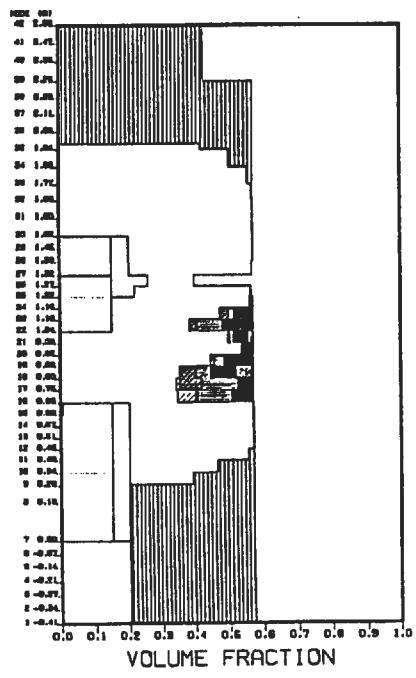
TOP 300 ms



TOP 301 ms

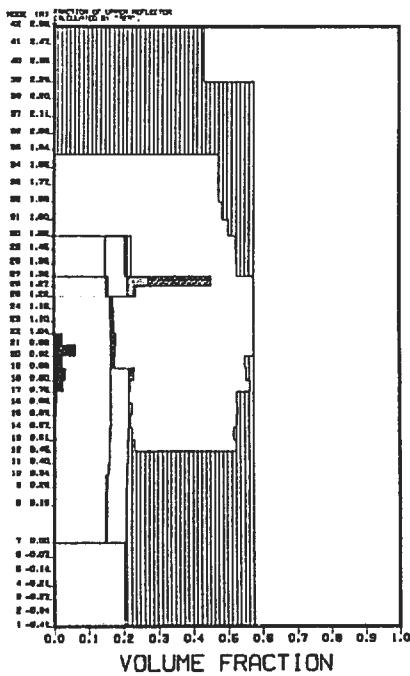


TOP 400 ms

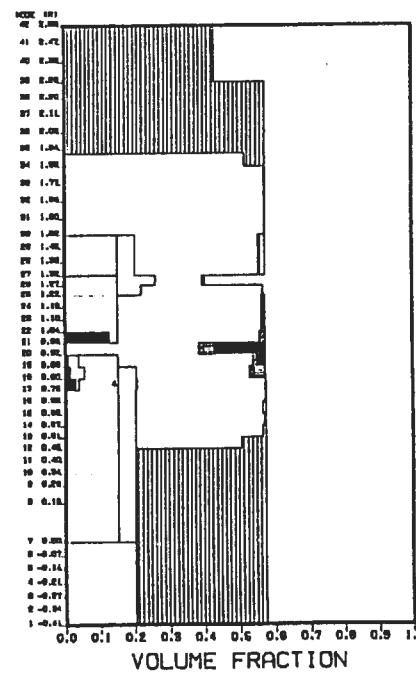


## E13 SIZE

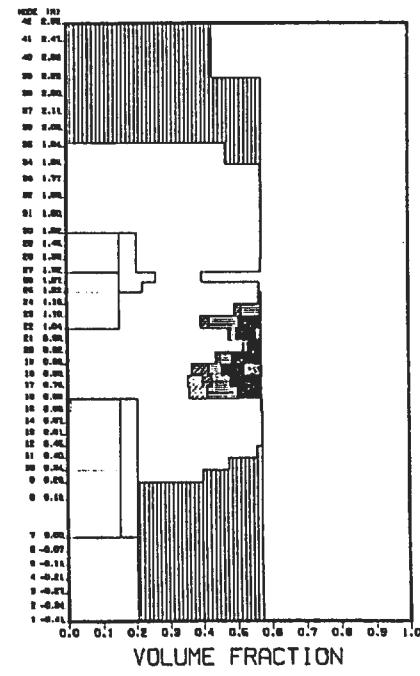
TOP 300 ms



TOP 301 ms

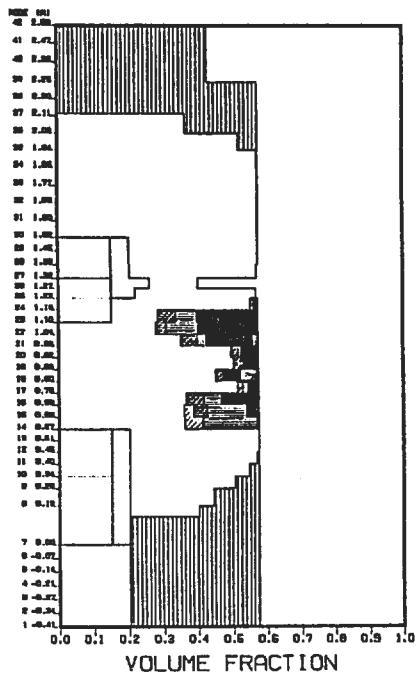


TOP 400 ms

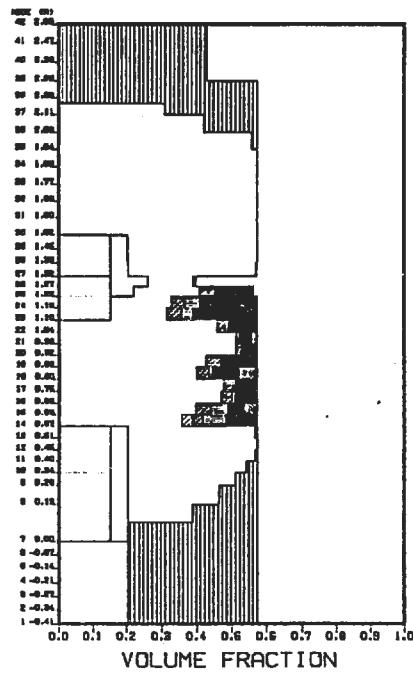


E13 BASE

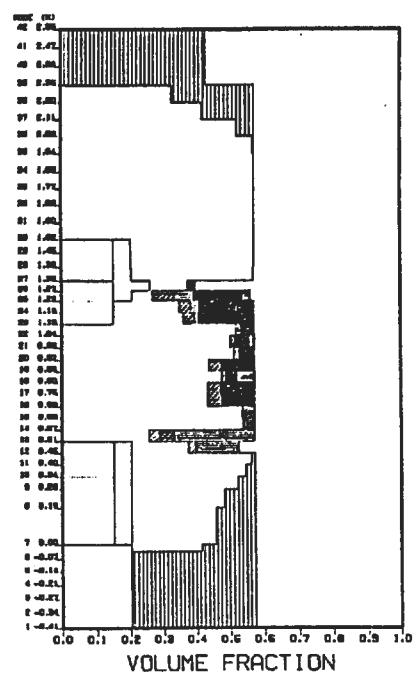
TOP 500 ms



TOP 600 ms

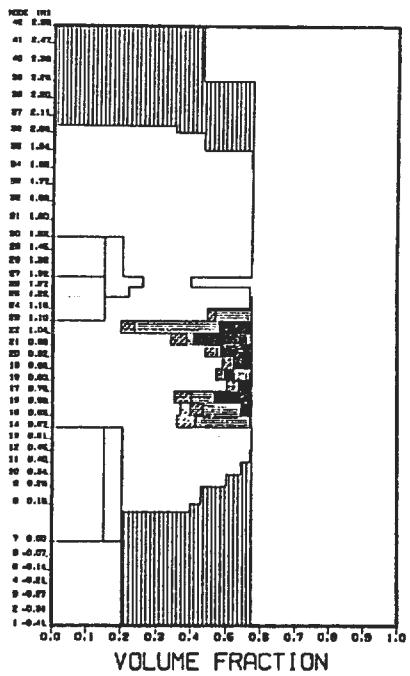


TOP 700 ms

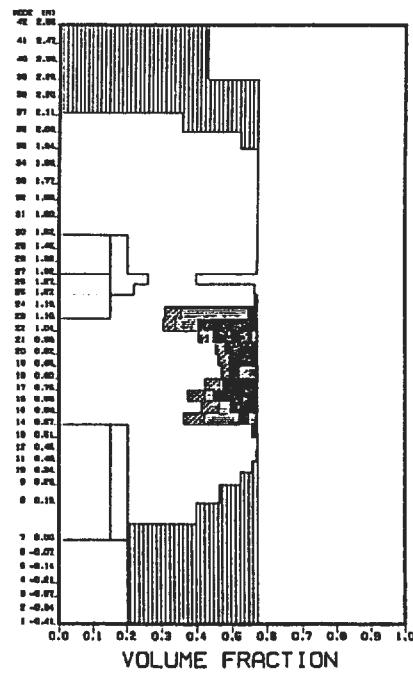


E13 SIZE

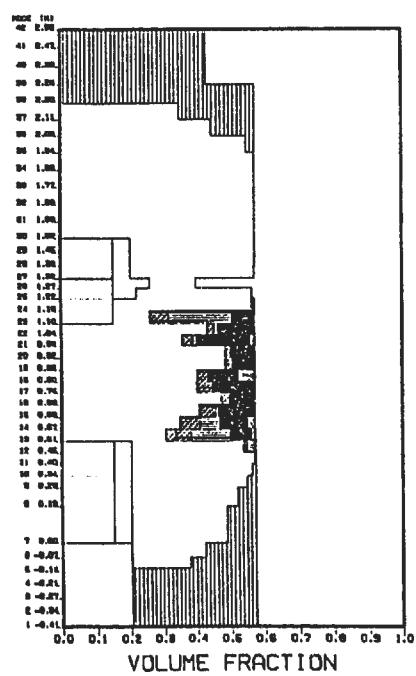
TOP 500 ms



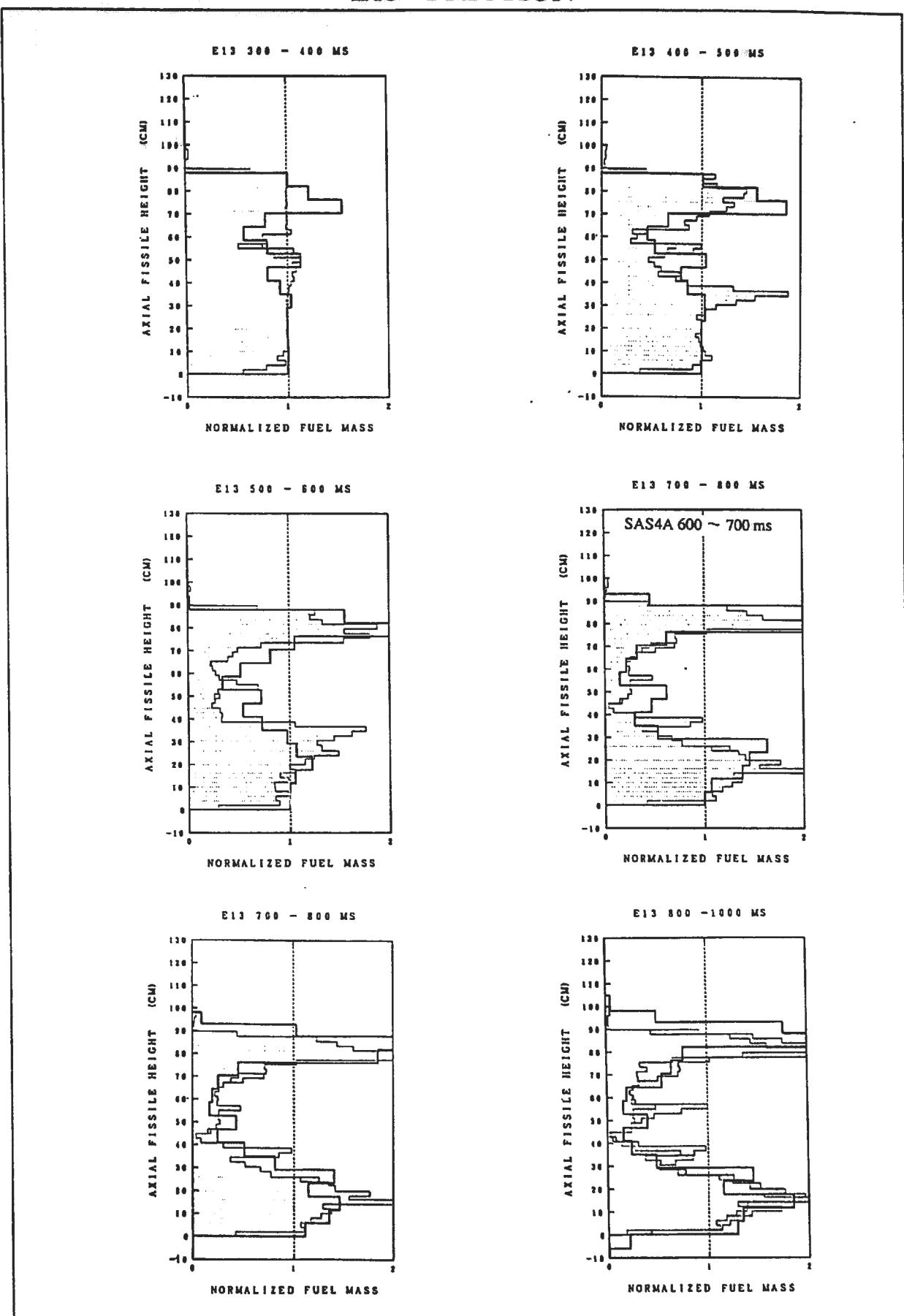
TOP 600 ms



TOP 700 ms



## E13 FRICITION

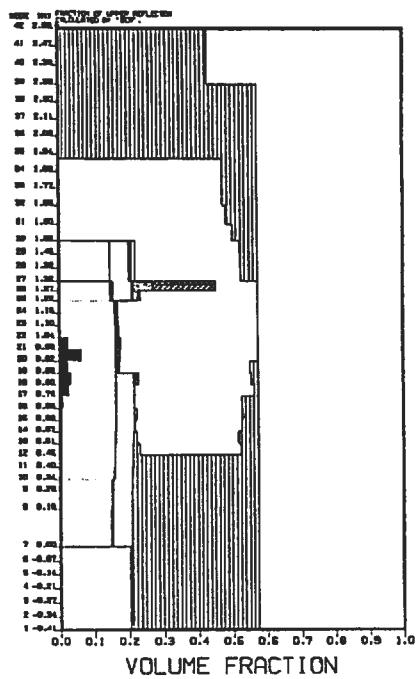


## E13 BASE

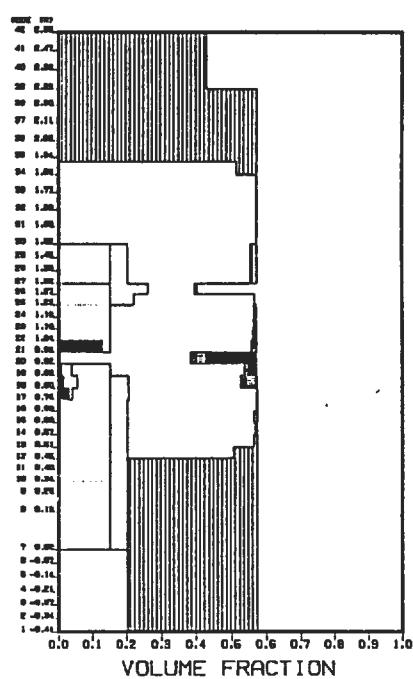
< LEGEND >

■	BOILANT FUEL
■	REFROZEN FUEL
■	CHUNK FUEL
■	MOLTEN STEEL
■	CHUNK STEEL

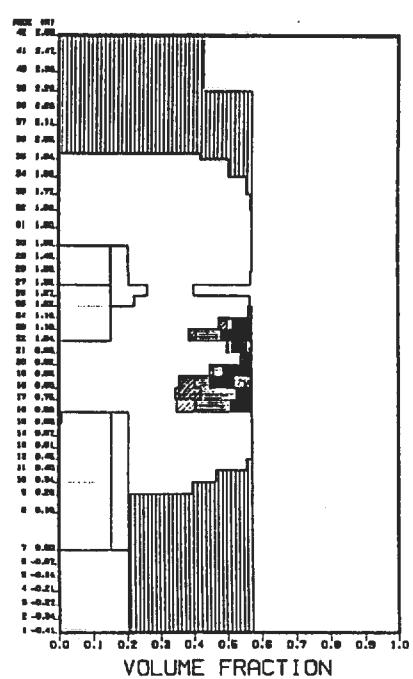
TOP 300 ms



TOP 301 ms

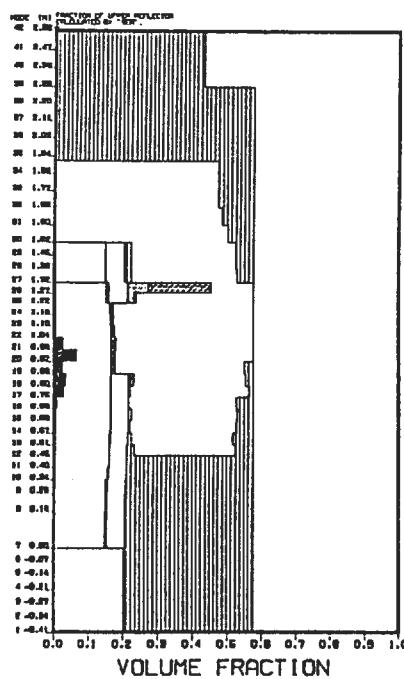


TOP 400 ms

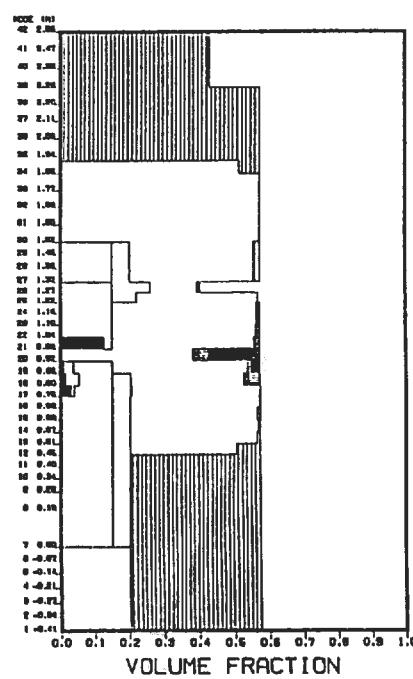


## E13 FRICTION

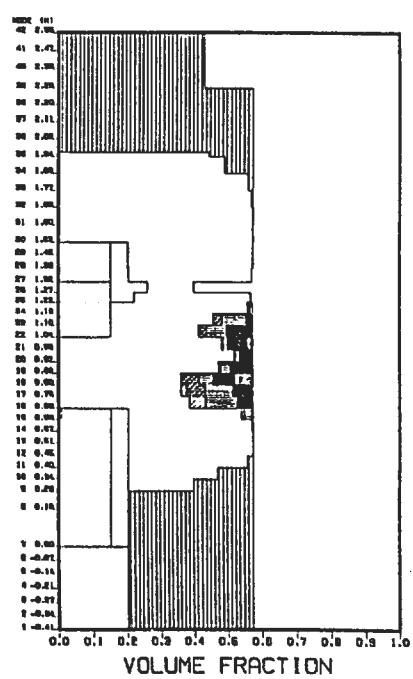
TOP 300 ms



TOP 301 ms

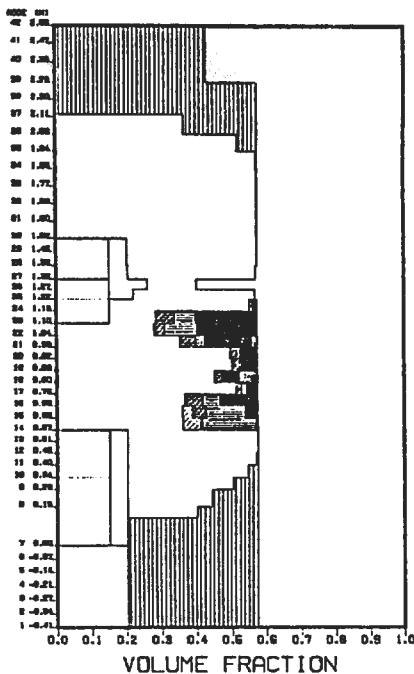


TOP 400 ms

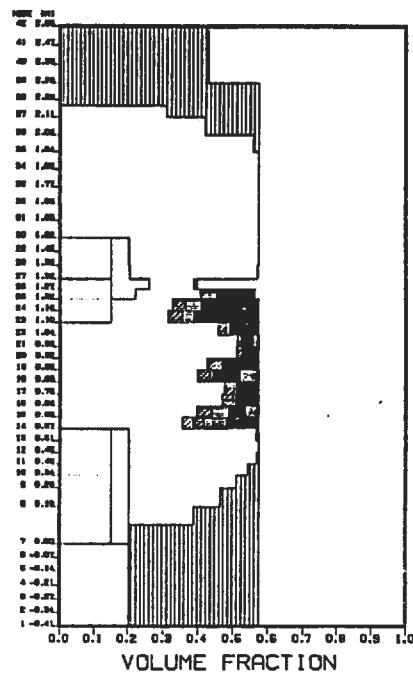


E13 BASE

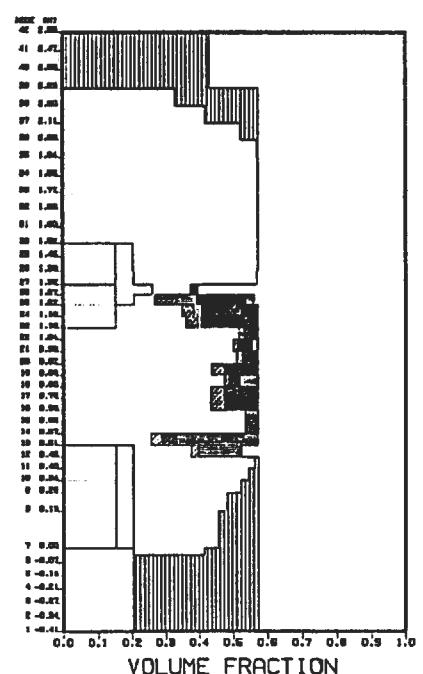
TOP 500 ms



TOP 600 ms

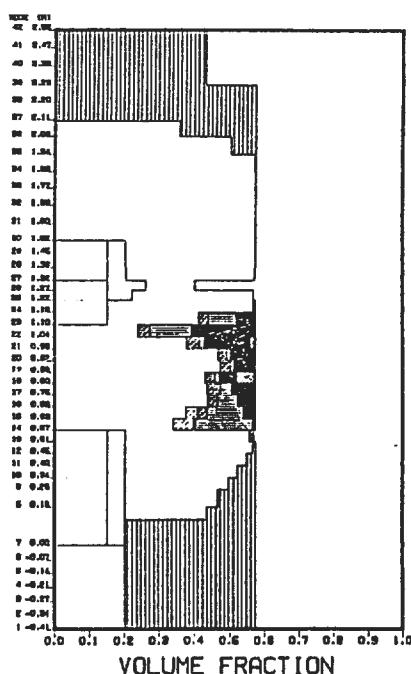


TOP 700 ms

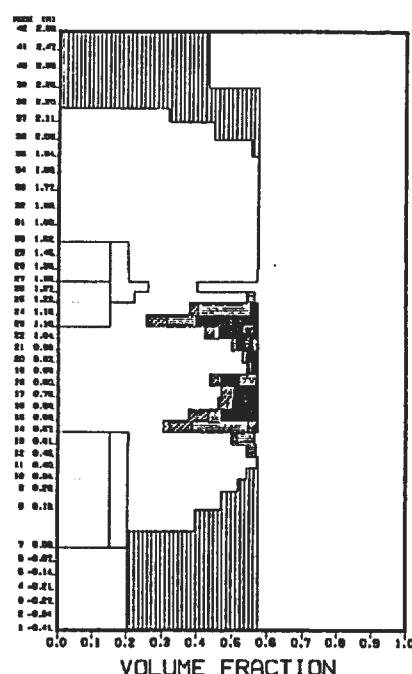


E13 FRICTION

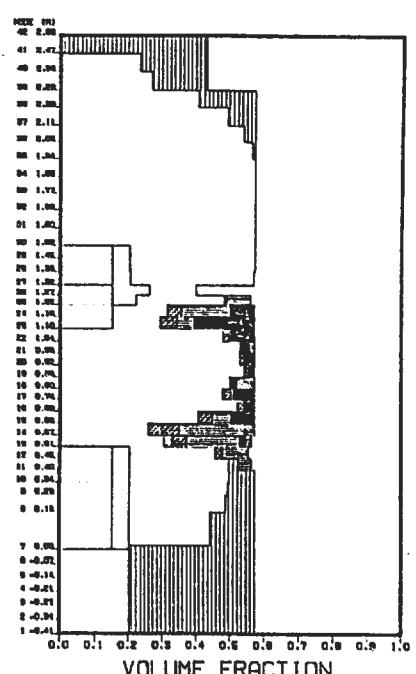
TOP 500 ms



TOP 600 ms

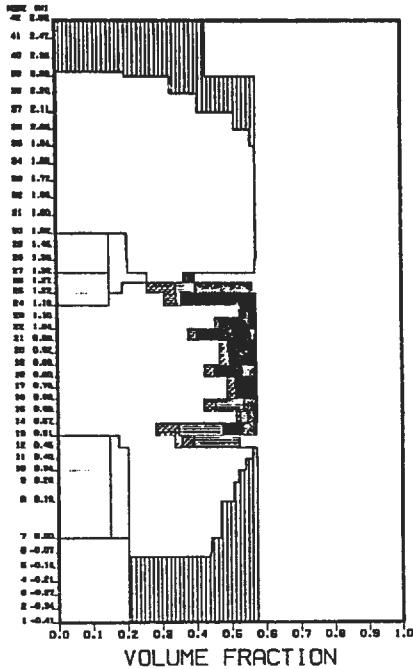


TOP 700 ms

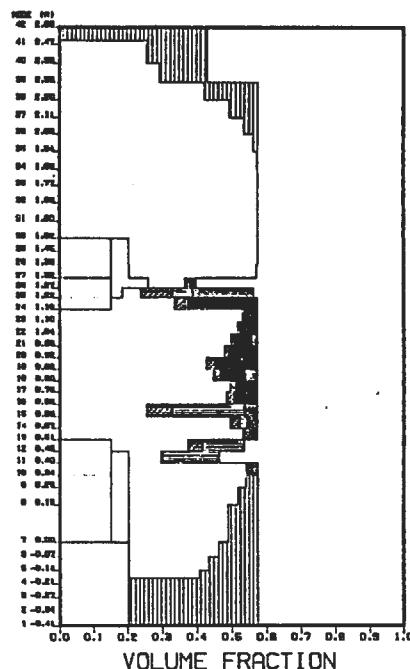


### E13 BASE

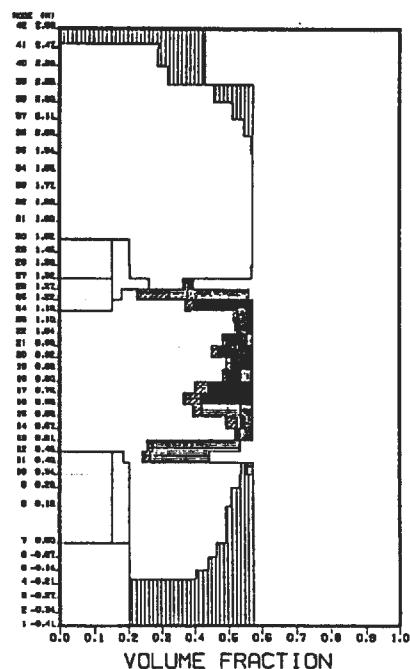
TOP 800 ms



TOP 900 ms

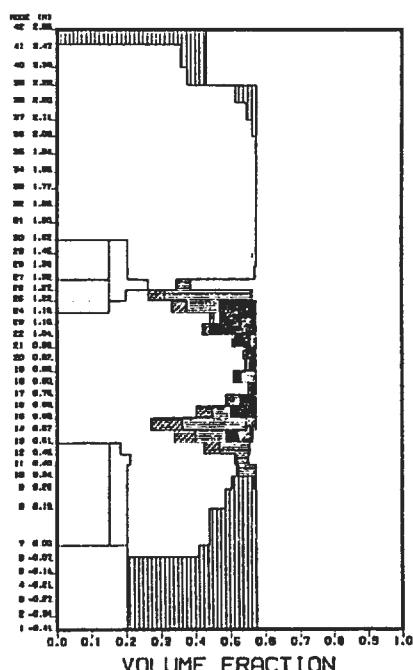


TOP 1000 ms

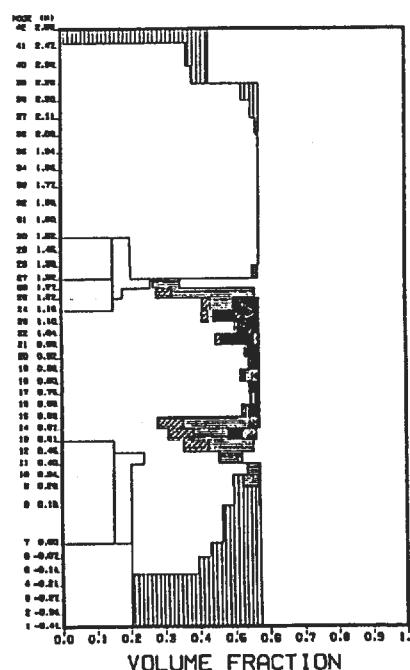


### E13 FRICTION

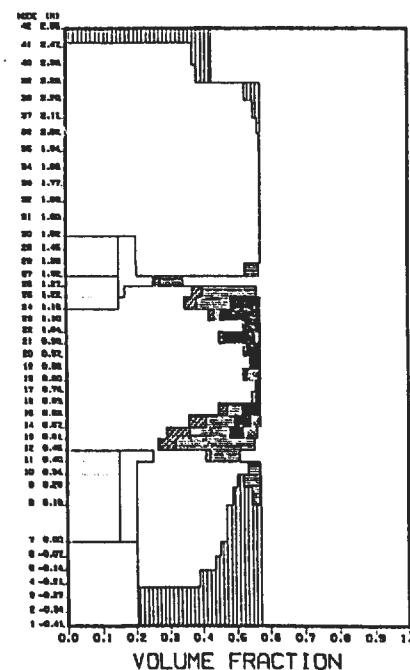
TOP 800 ms



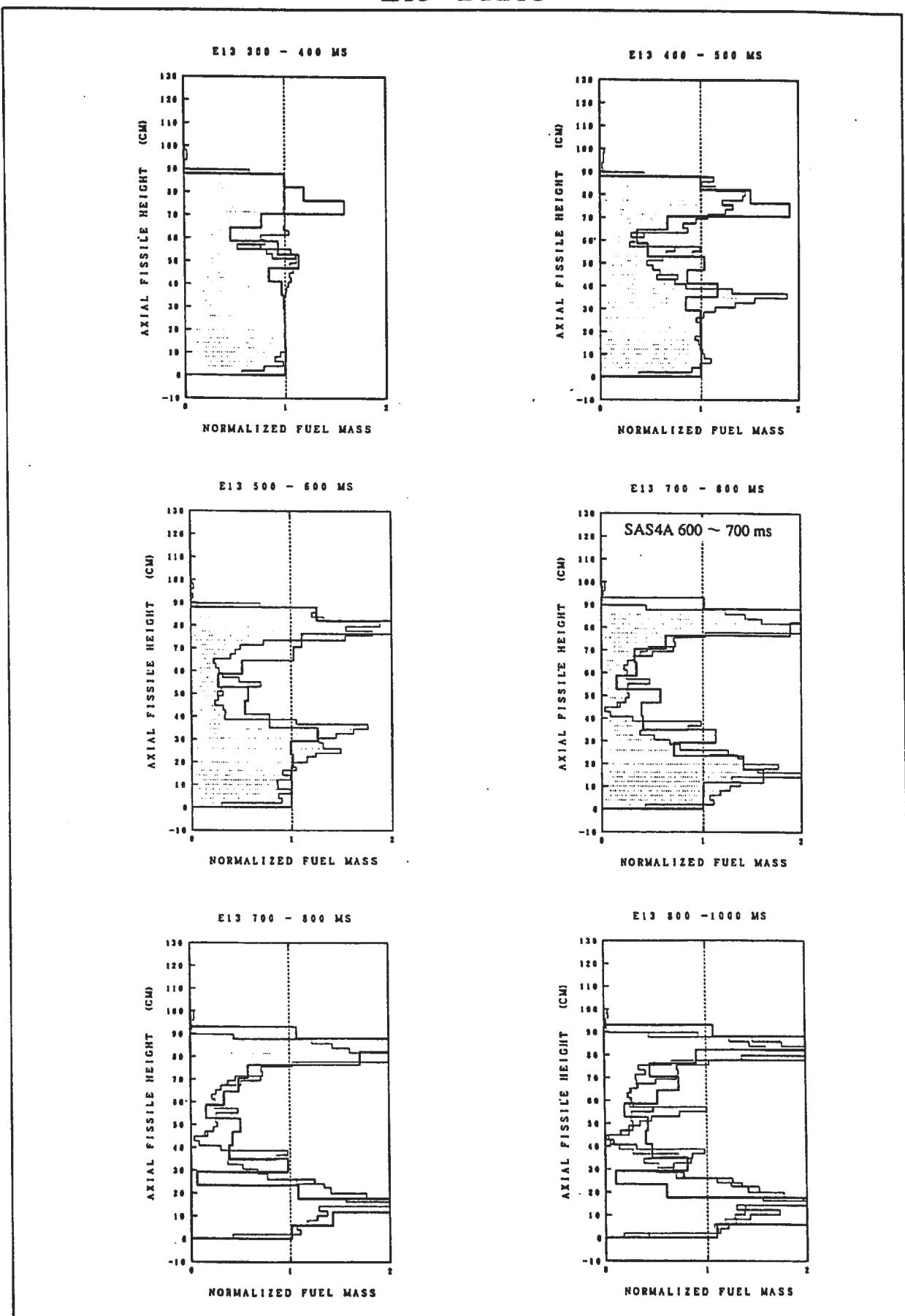
TOP 900 ms



TOP 1000 ms



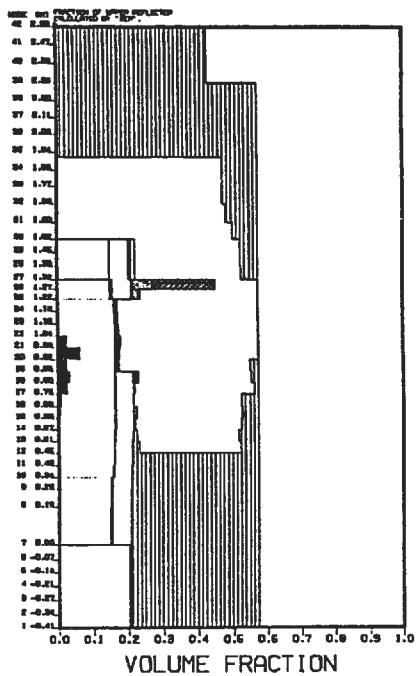
## E13 DRAG



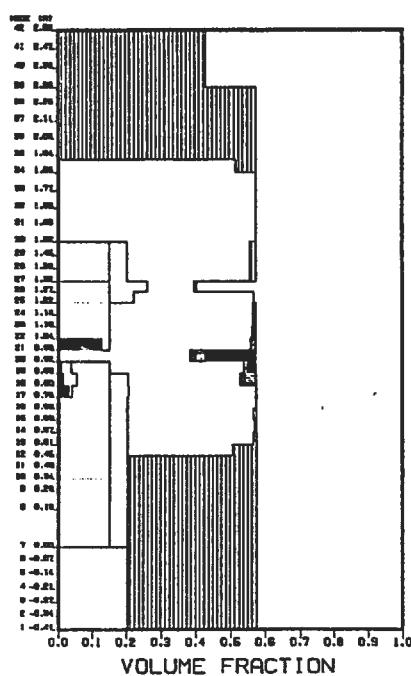
E13 BASE

< LEGEND >  
 Hatched: MOLTEN FUEL  
 Solid: REFROZEN FUEL  
 Dashed: CHUNK FUEL  
 White: MOLTEN STEEL  
 Cross-hatched: CHUNK STEEL

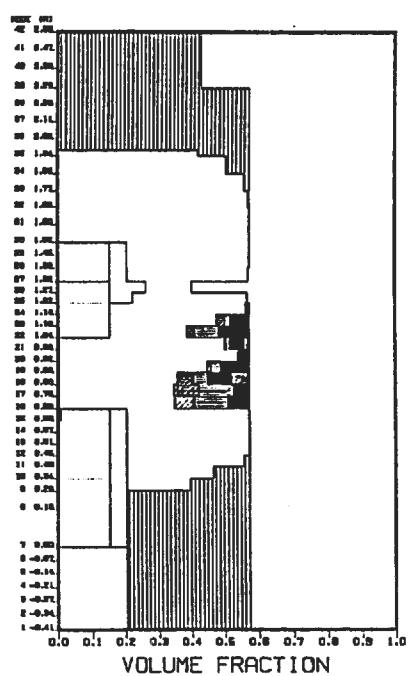
TOP 300 ms



TOP 301 ms

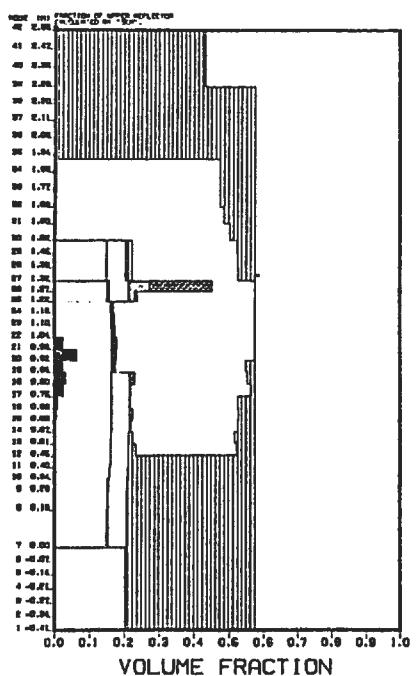


TOP 400 ms

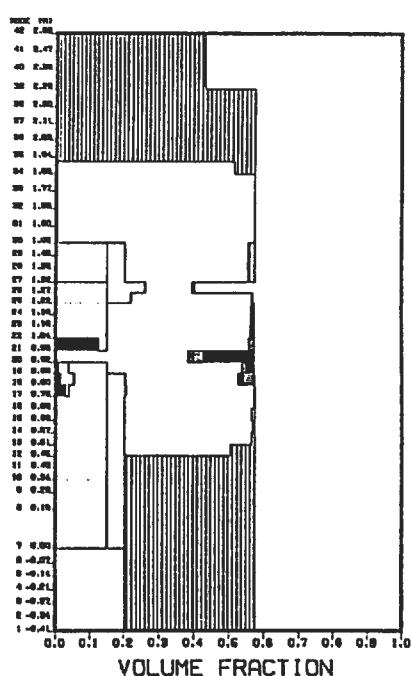


E13 DRAG

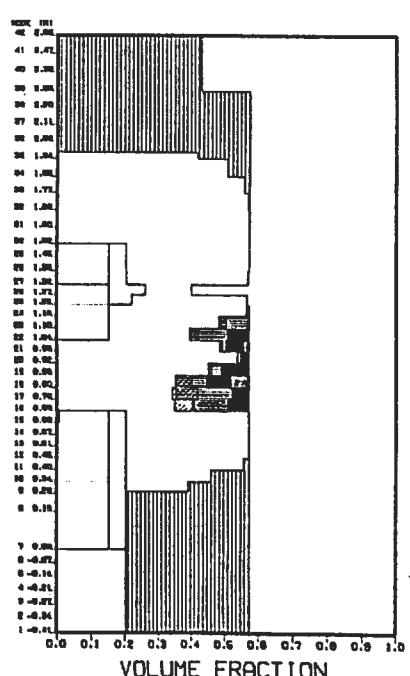
TOP 300 ms



TOP 301 ms

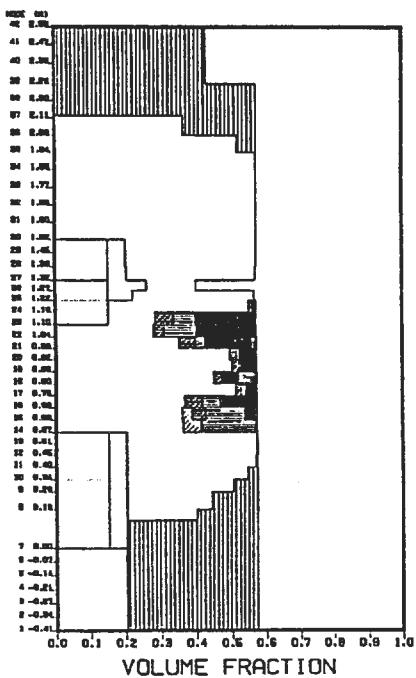


TOP 400 ms

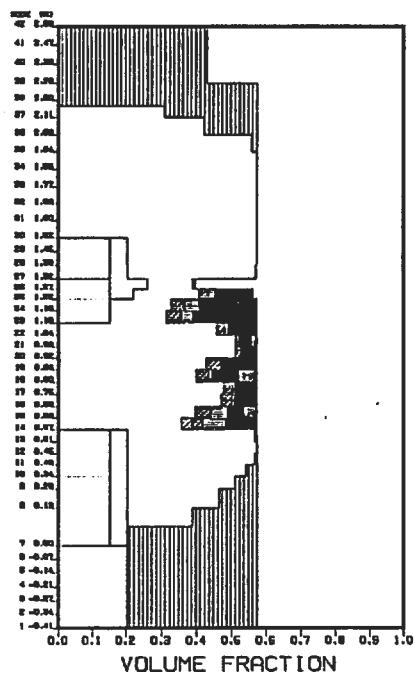


E13 BASE

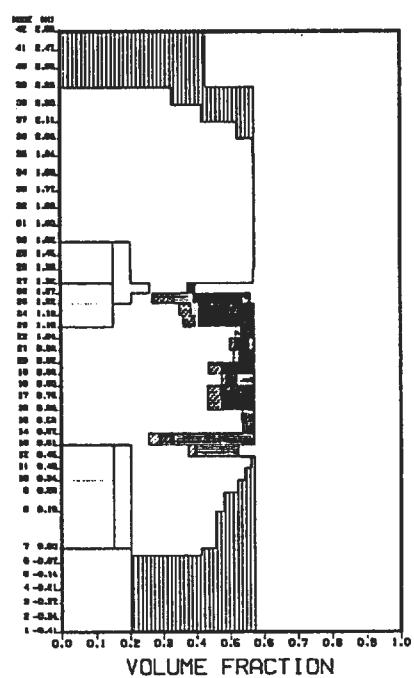
TOP 500 ms



TOP 600 ms

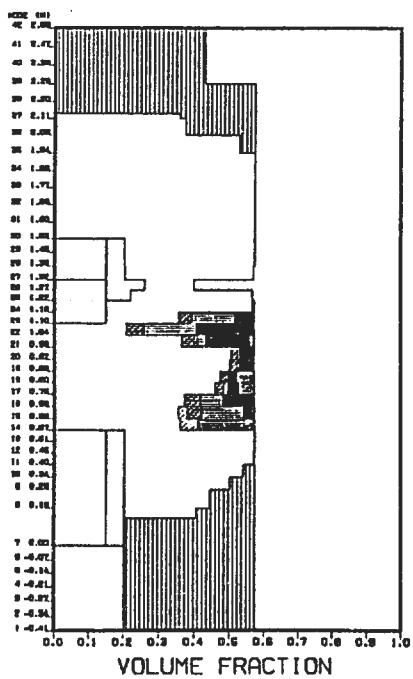


TOP 700 ms

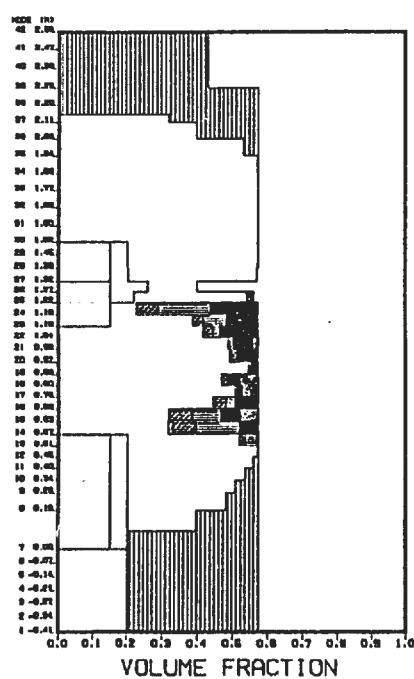


E13 DRAG

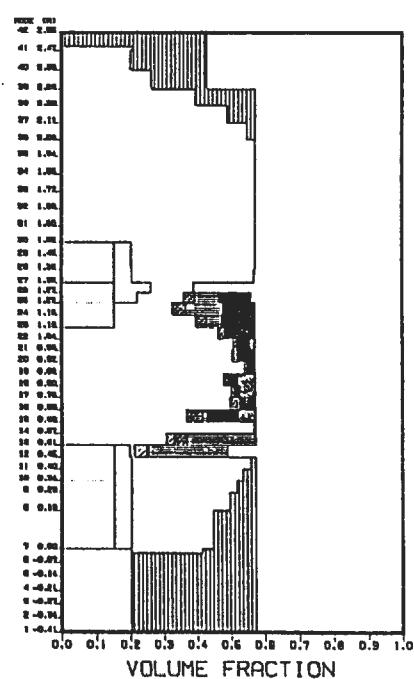
TOP 500 ms



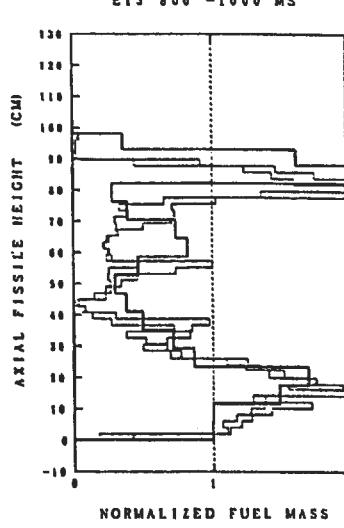
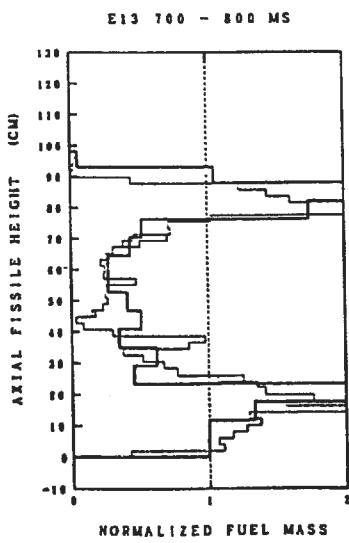
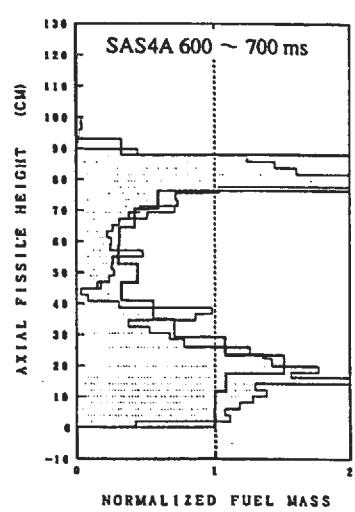
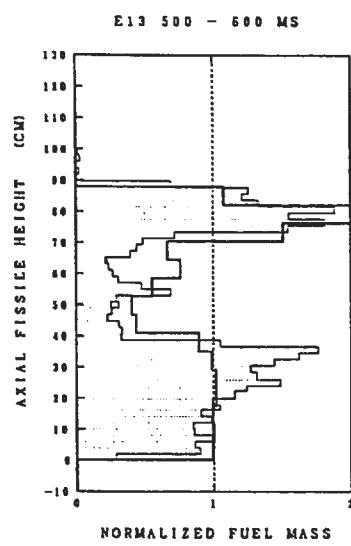
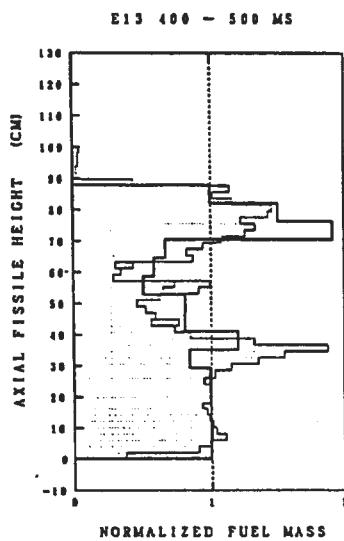
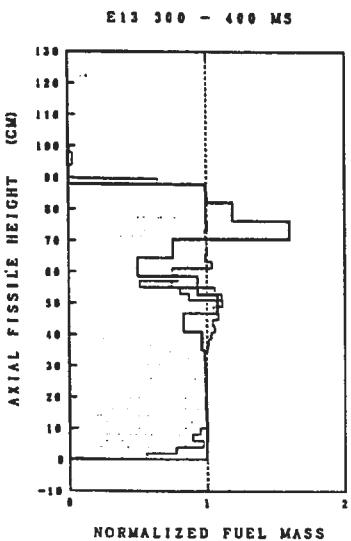
TOP 600 ms



TOP 700 ms



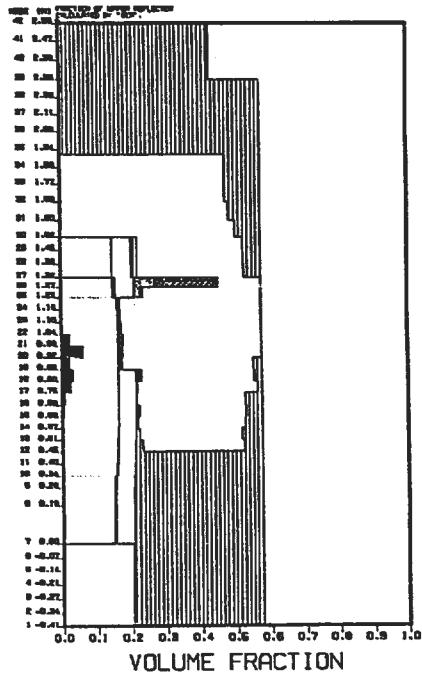
## E13 FREEZING



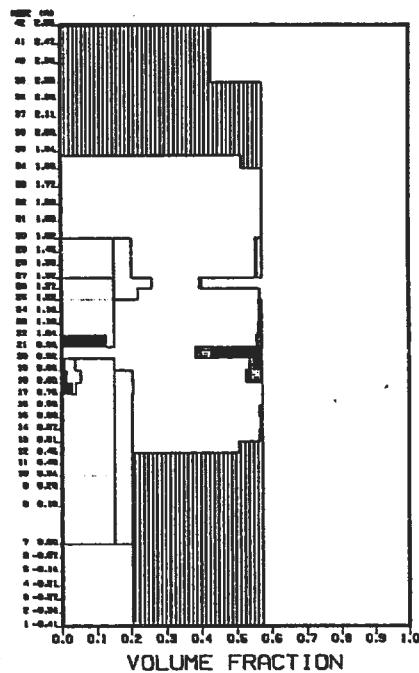
## E13 BASE

< LEGEND >  
 0001: COOLANT  
 0002: MOLTEN FUEL  
 0003: REFROZEN FUEL  
 0004: CHUNK FUEL  
 0005: MOLTEN STEEL  
 0006: CRACK STEEL

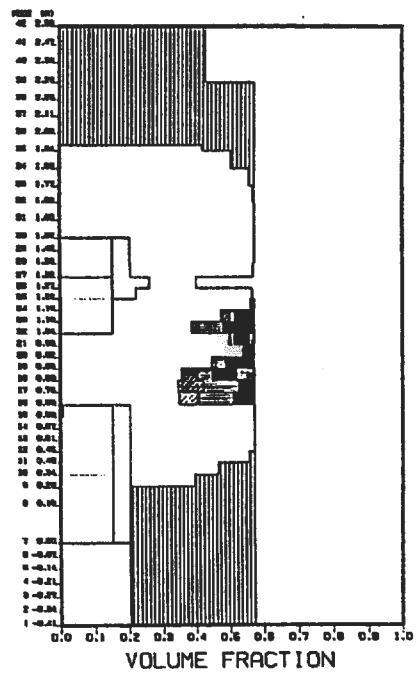
TOP 300 ms



TOP 301 ms

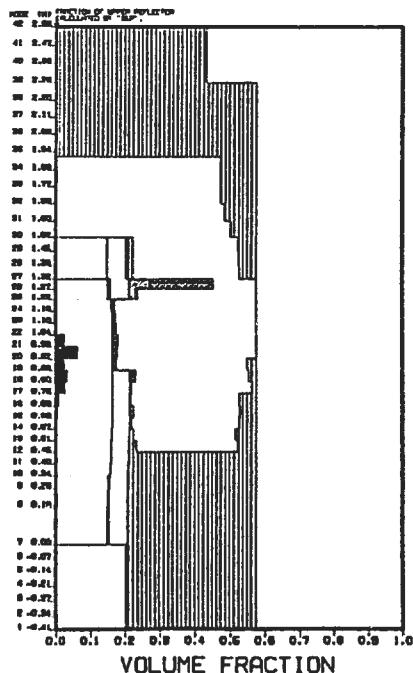


TOP 400 ms

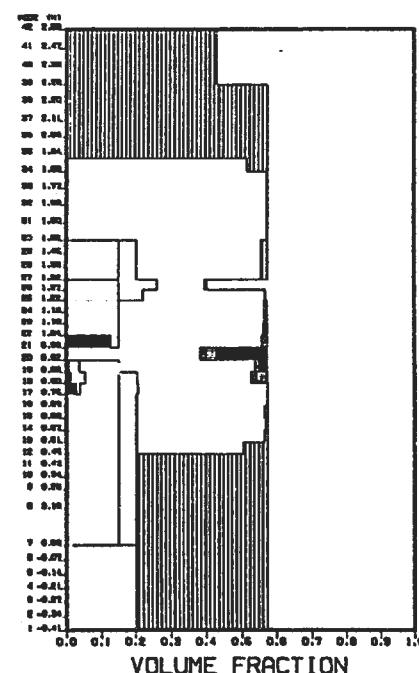


## E13 FREEZING

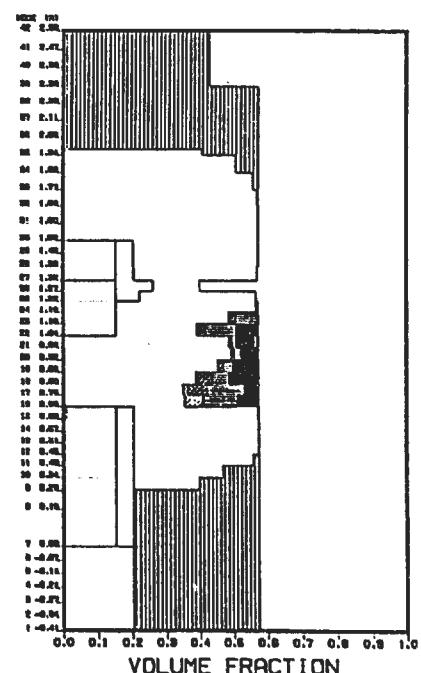
TOP 300 ms



TOP 301 ms

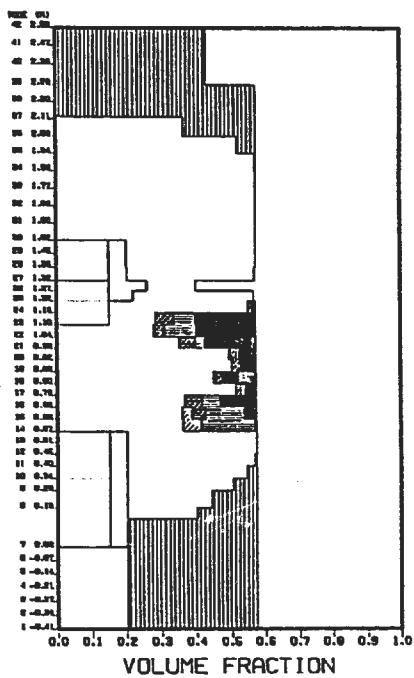


TOP 400 ms

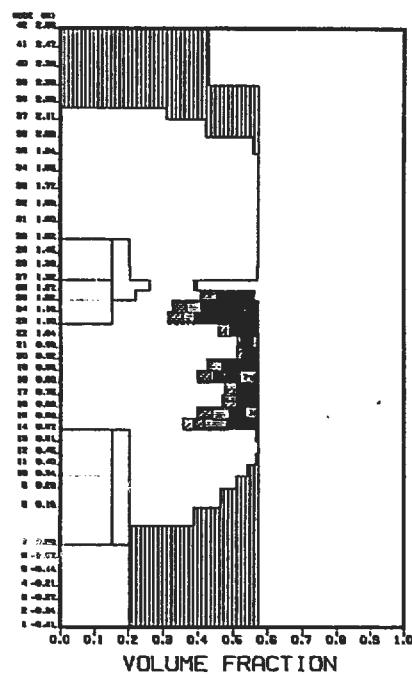


E13 BASE

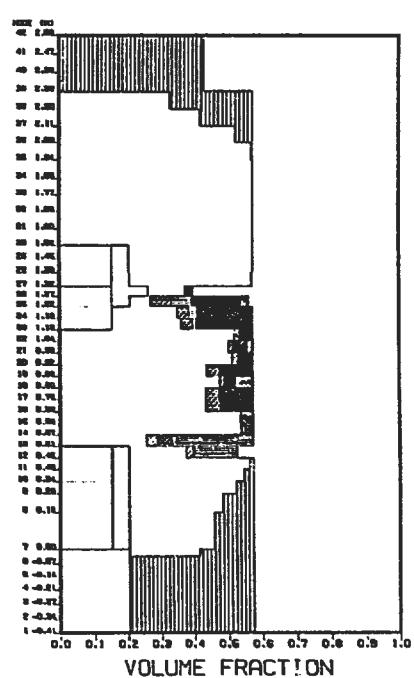
TOP 500 ms



TOP 600 ms

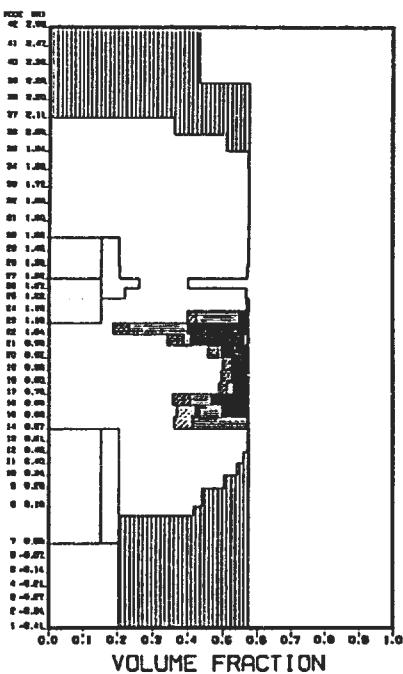


TOP 700 ms

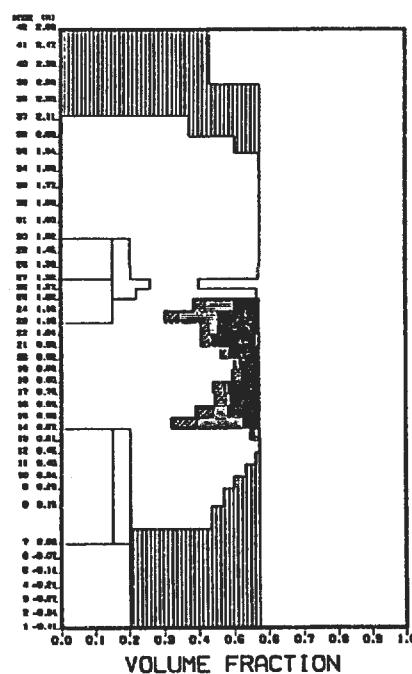


E13 FREEZING

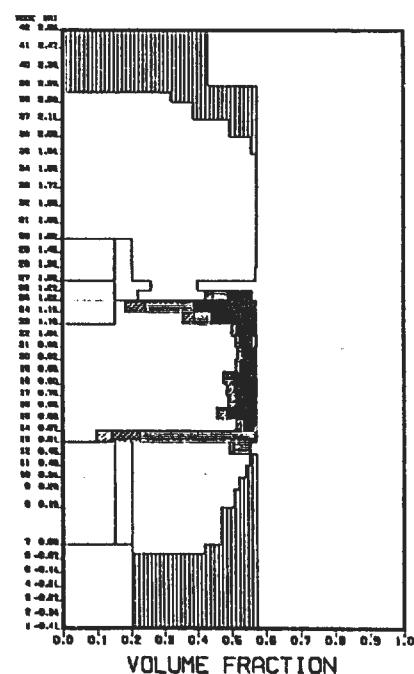
TOP 500 ms



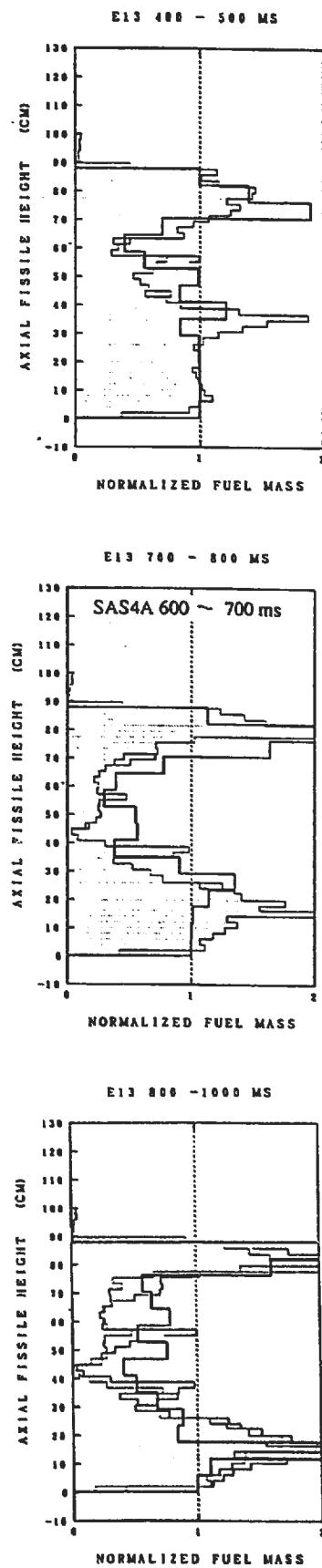
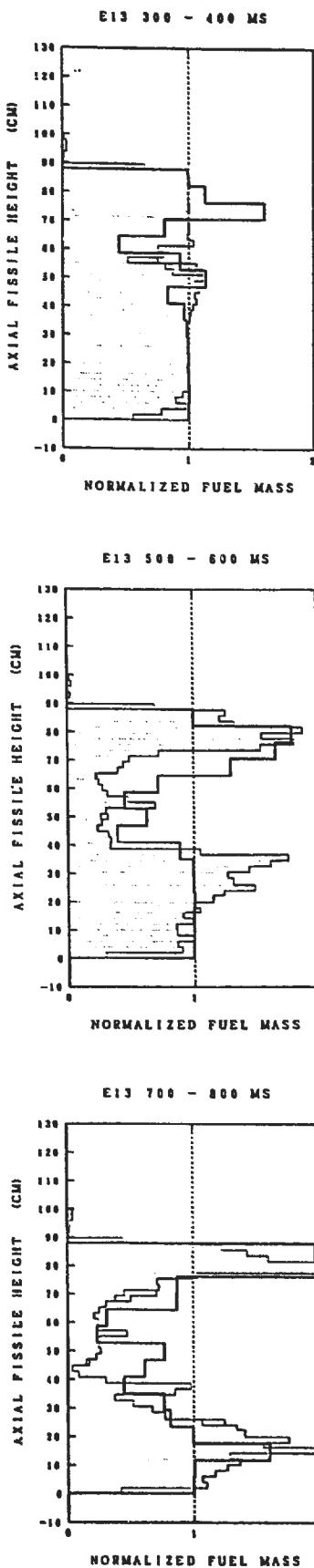
TOP 600 ms



TOP 700 ms



## E13 STEEL FREEZE

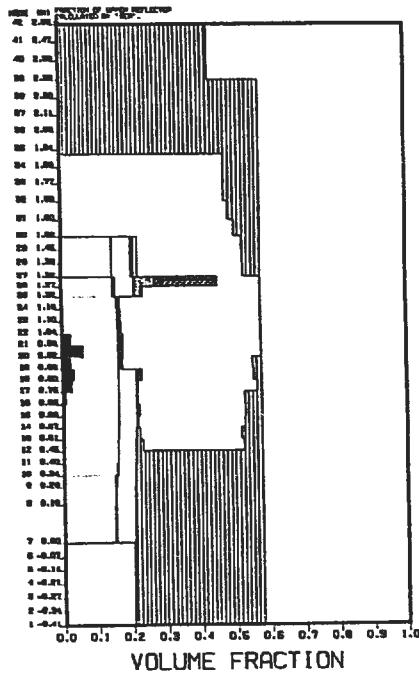


## E13 BASE

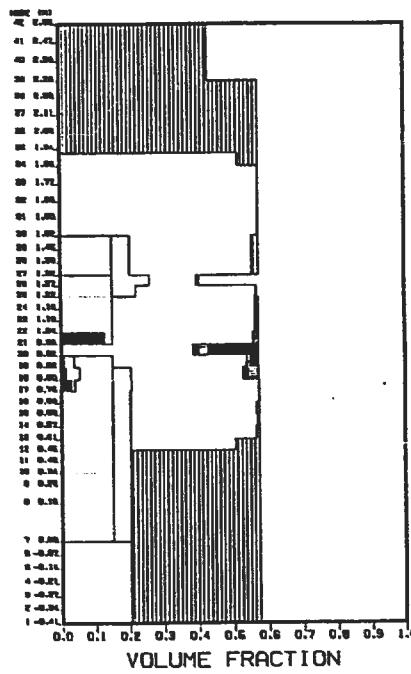
< LEGEND >

- COOLANT
- HOLYEN FUEL
- REFRZEN FUEL
- CHUNK FUEL
- HOLYEN STEEL
- CHUNK STEEL

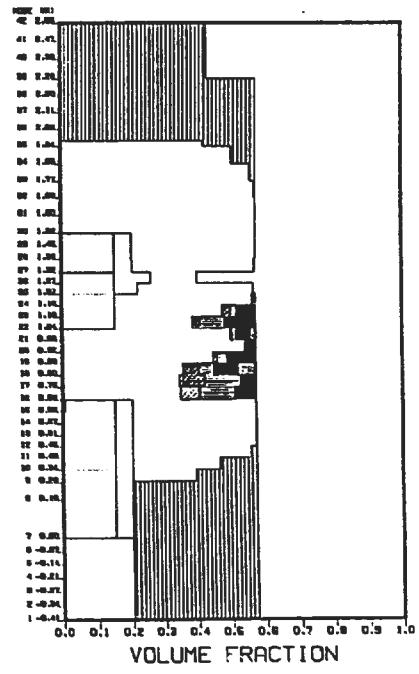
TOP 300 ms



TOP 301 ms

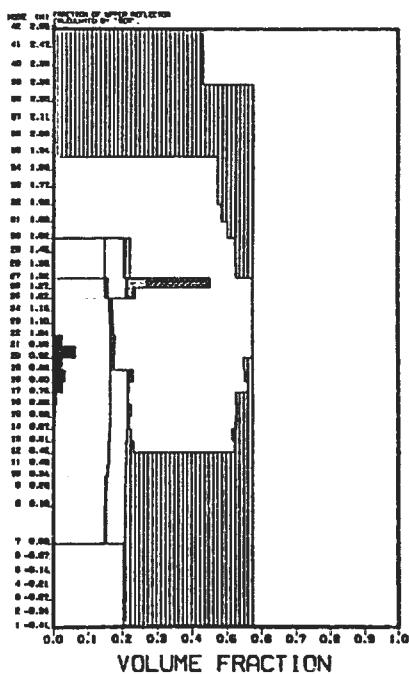


TOP 400 ms

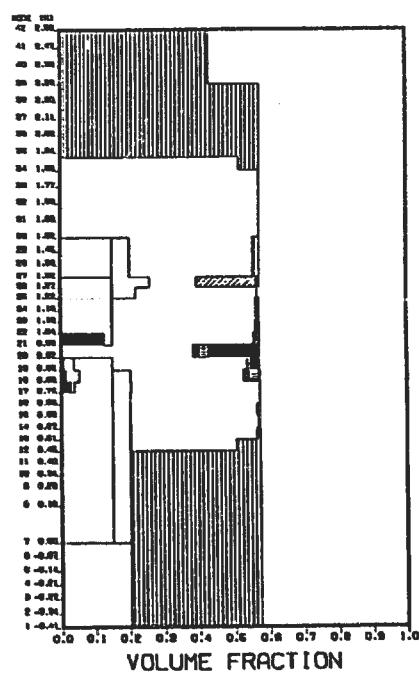


## E13 STEEL FREEZE

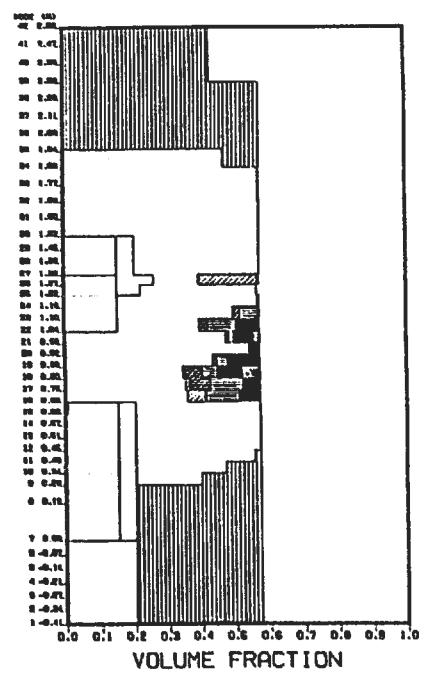
TOP 300 ms



TOP 301 ms

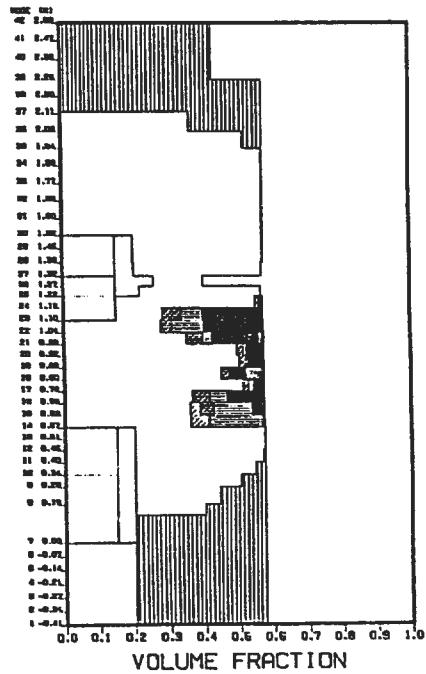


TOP 400 ms

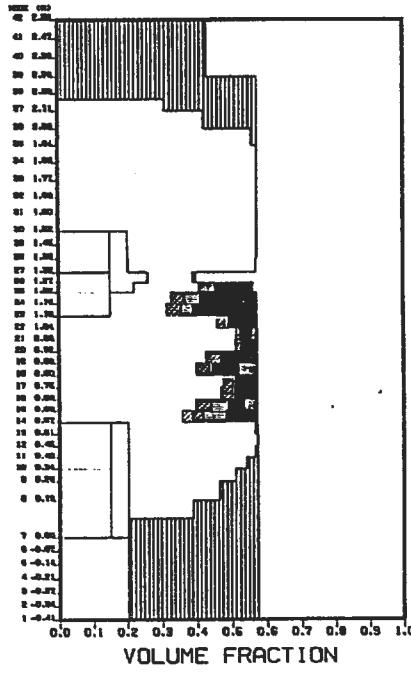


E13 BASE

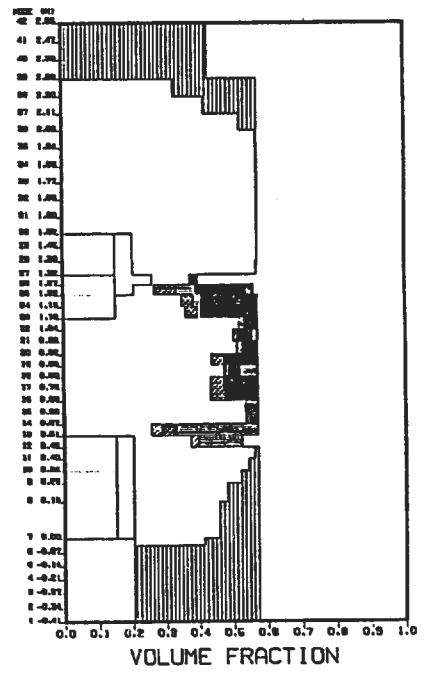
TOP 500 ms



TOP 600 ms

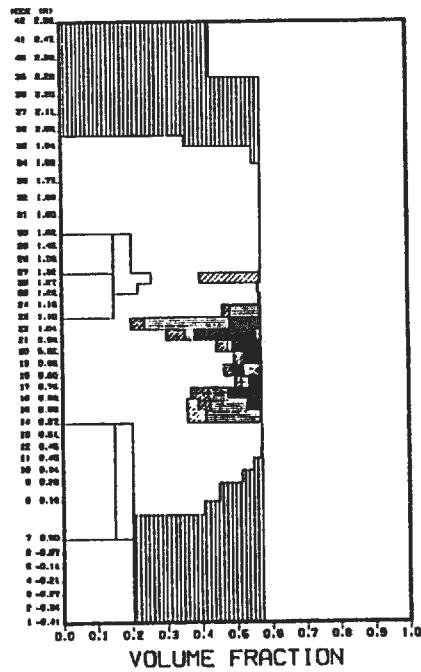


TOP 700 ms

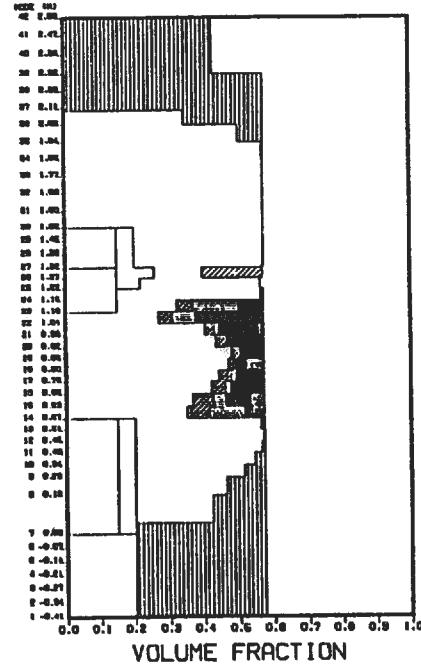


E13 STEEL FREEZE

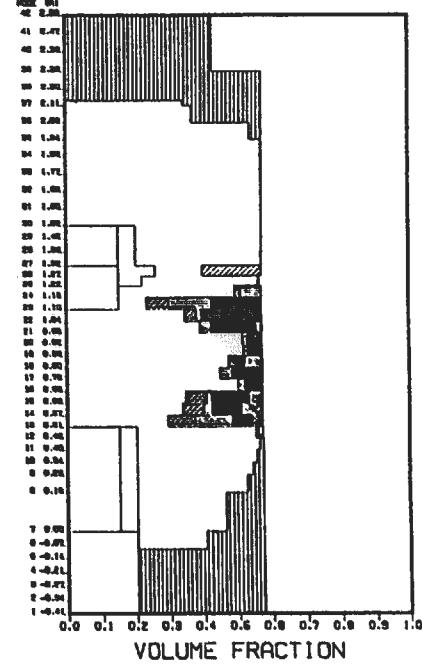
TOP 500 ms



TOP 600 ms

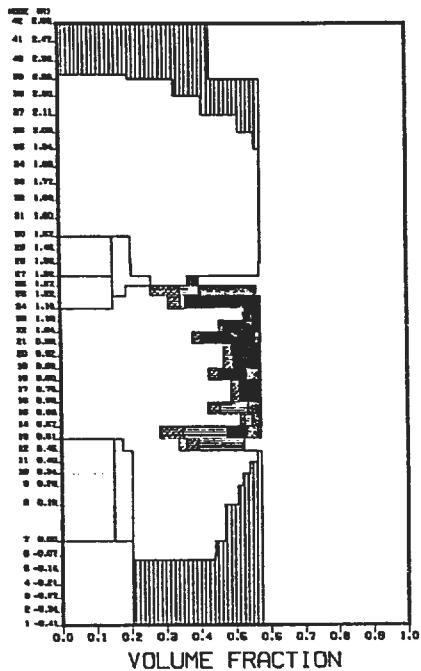


TOP 700 ms

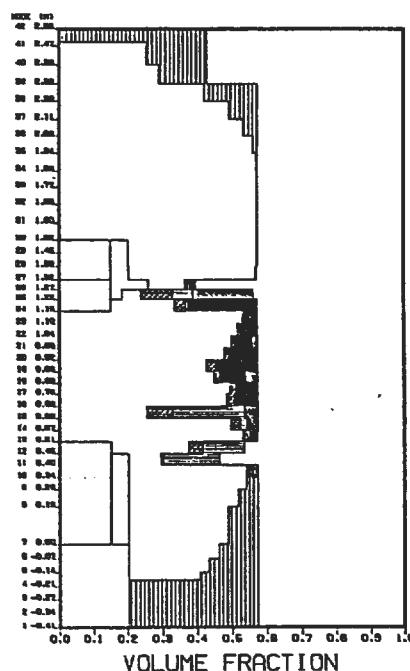


E13 BASE

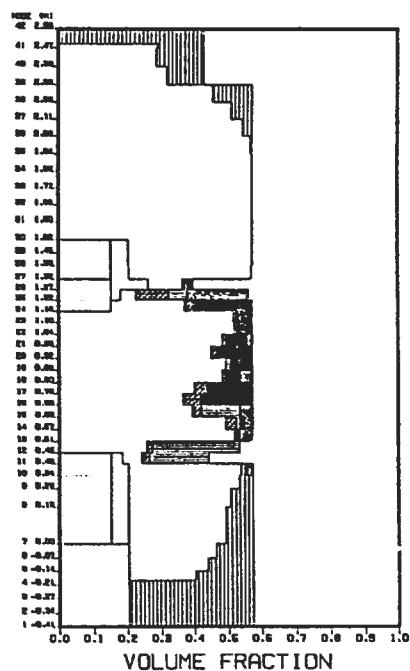
TOP 800 ms



TOP 900 ms

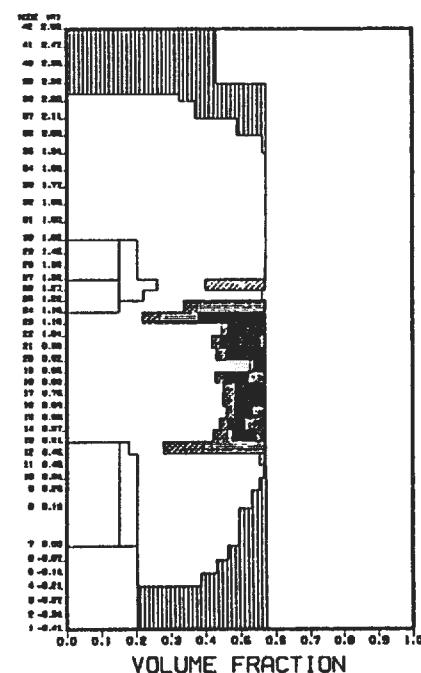


TOP 1000 ms

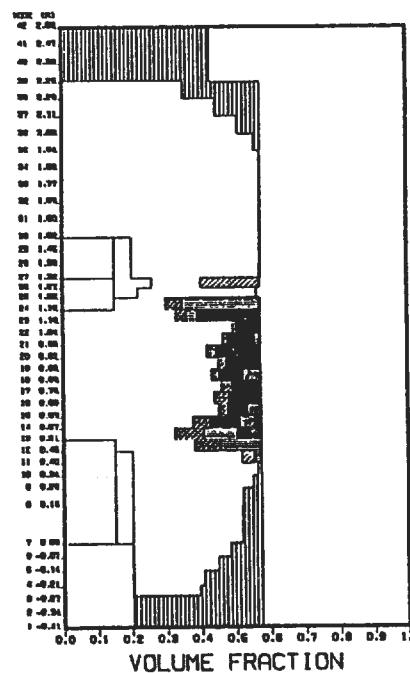


E13 STEEL FREEZE

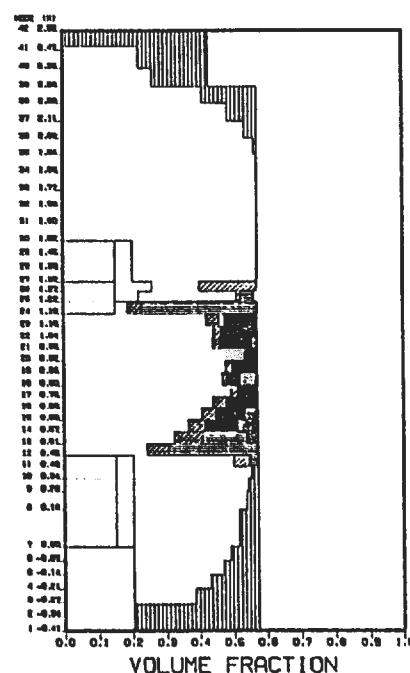
TOP 800 ms



TOP 900 ms

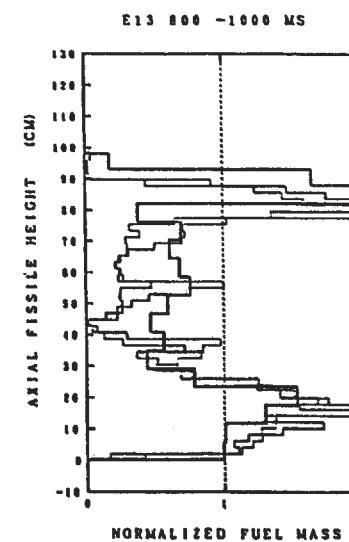
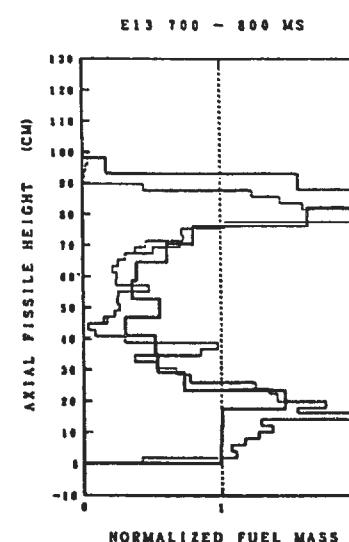
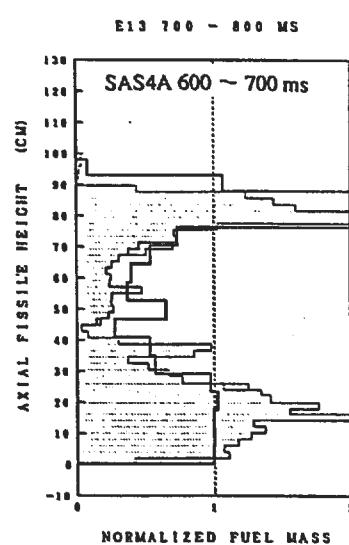
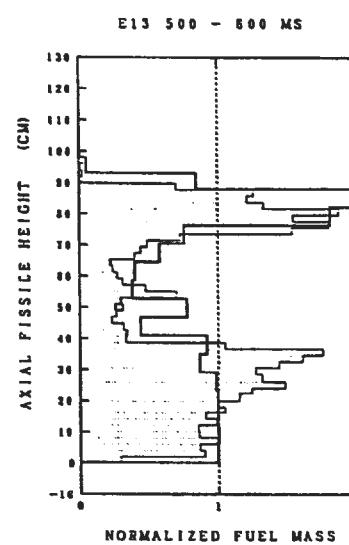
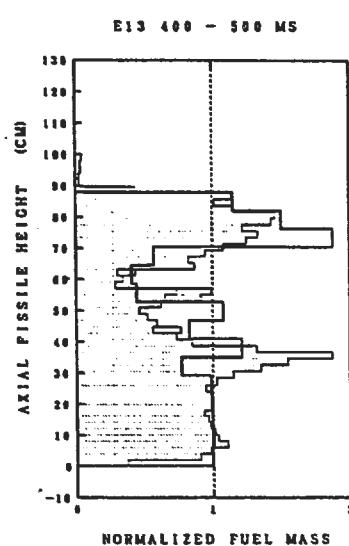
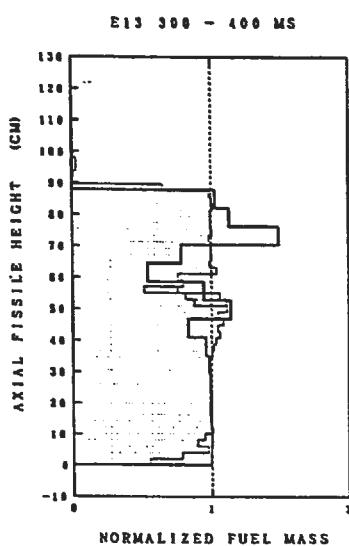


TOP 1000 ms



PNC TN9410 93-231

## E13 JAM

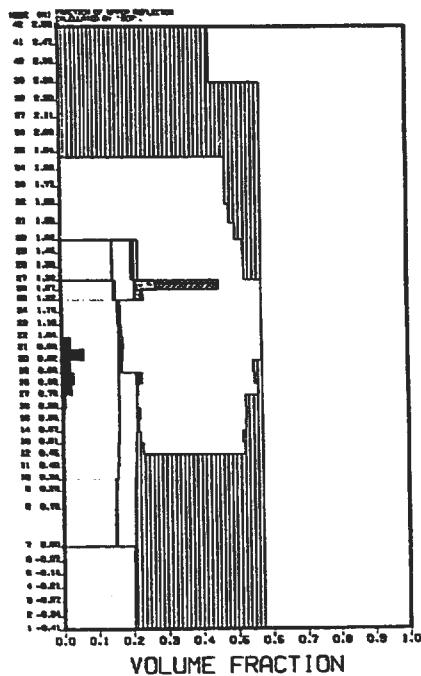


E13 BASE

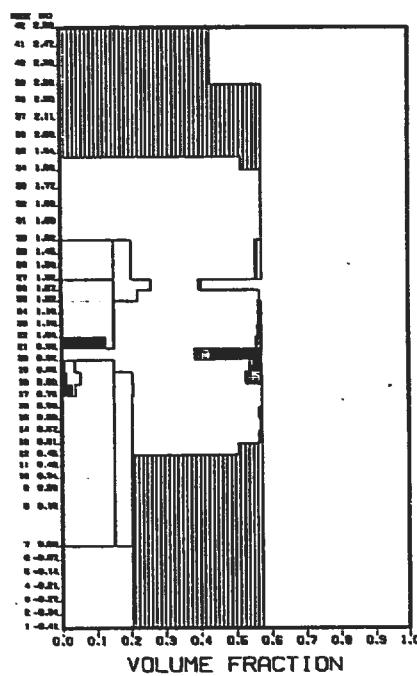
< LEGEND >

- COOLANT
- REFROZEN FUEL
- REFROZEN FUEL
- CHUNK FUEL
- MOLTEN STEEL
- CHUNK STEEL

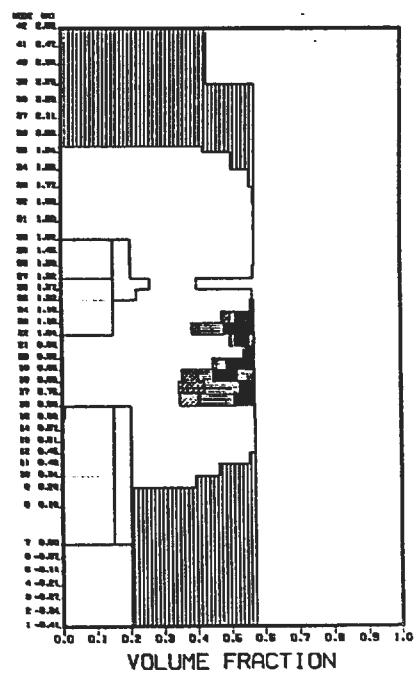
TOP 300 ms



TOP 301 ms

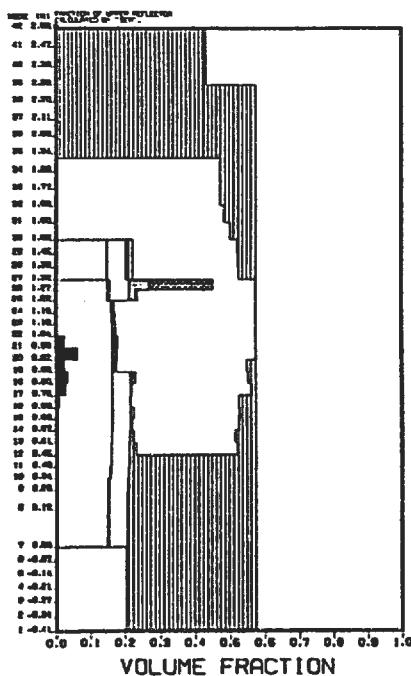


TOP 400 ms

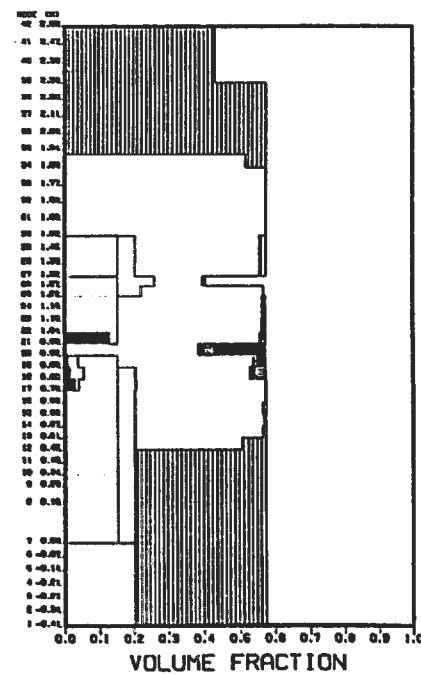


E13 JAM

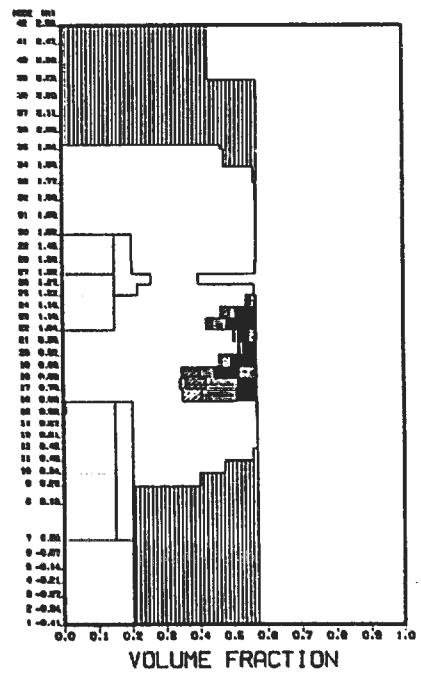
TOP 300 ms



TOP 301 ms

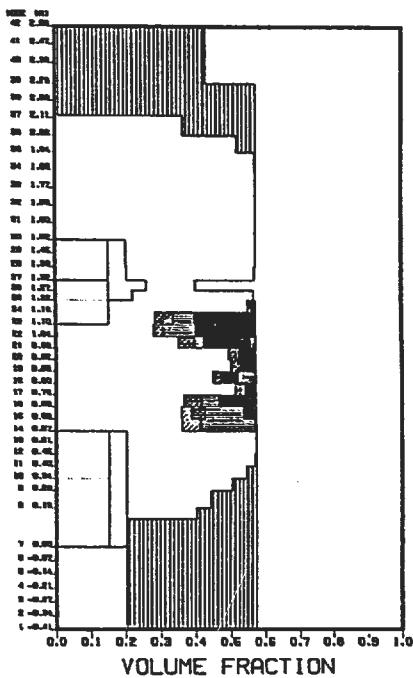


TOP 400 ms

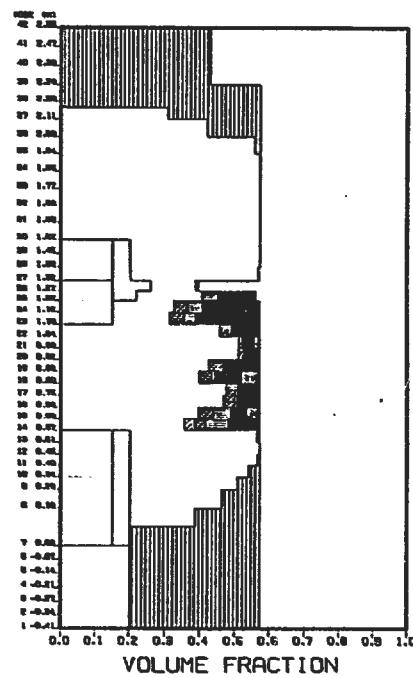


## E13 BASE

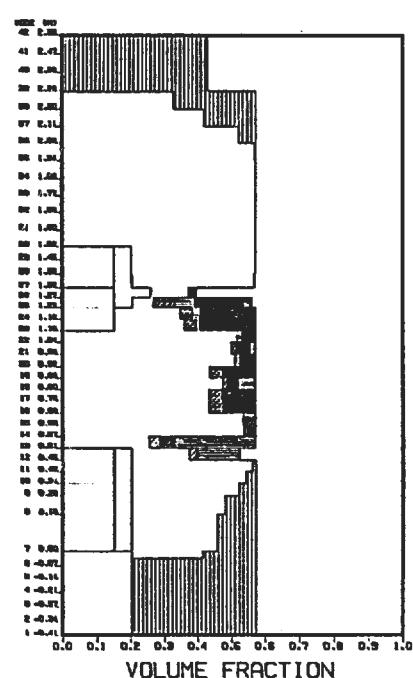
TOP 500 ms



TOP 600 ms

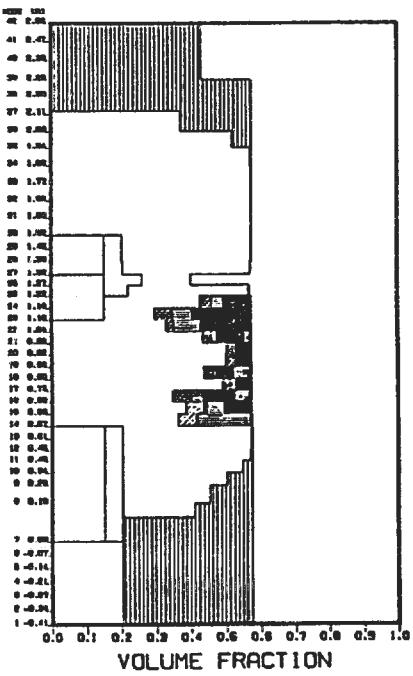


TOP 700 ms

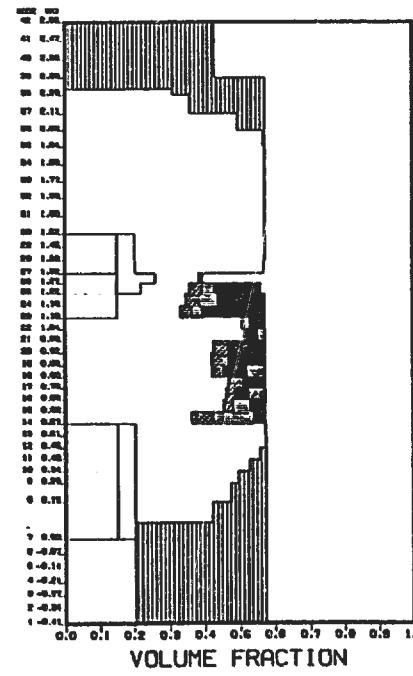


## E13 JAM

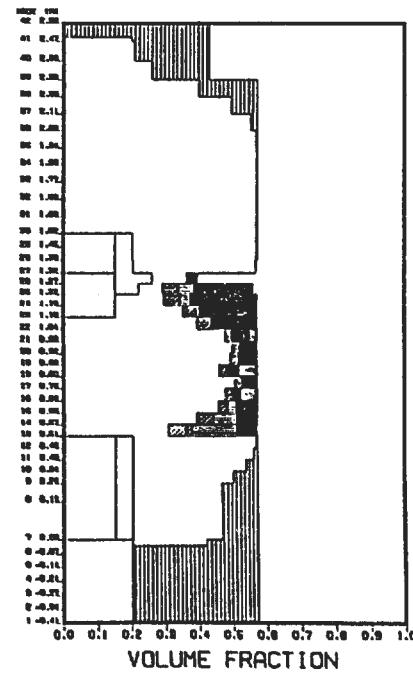
TOP 500 ms



TOP 600 ms

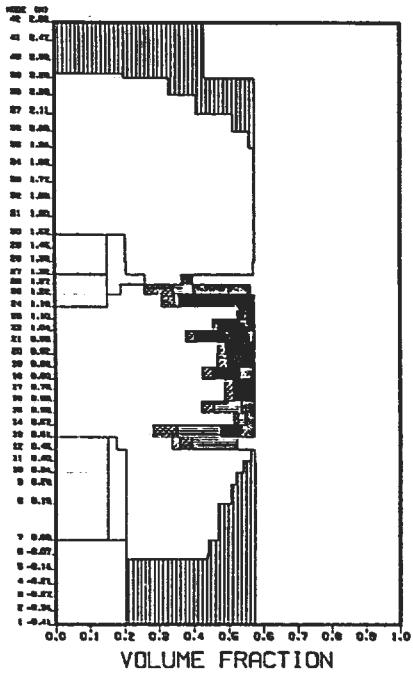


TOP 700 ms

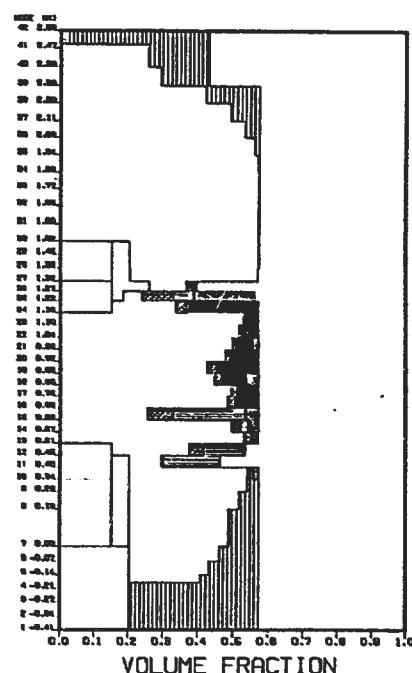


E13 BASE

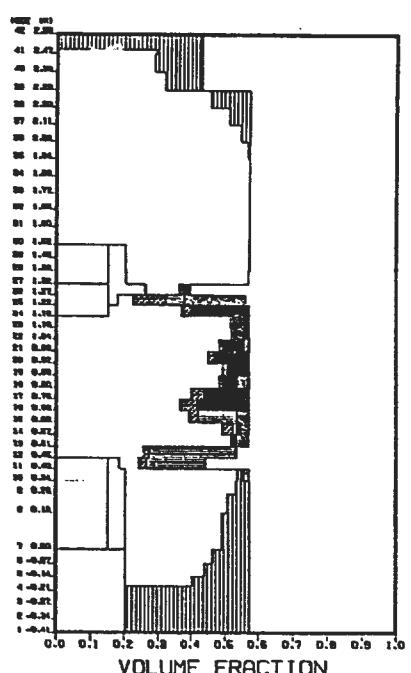
TOP 800 ms



TOP 900 ms

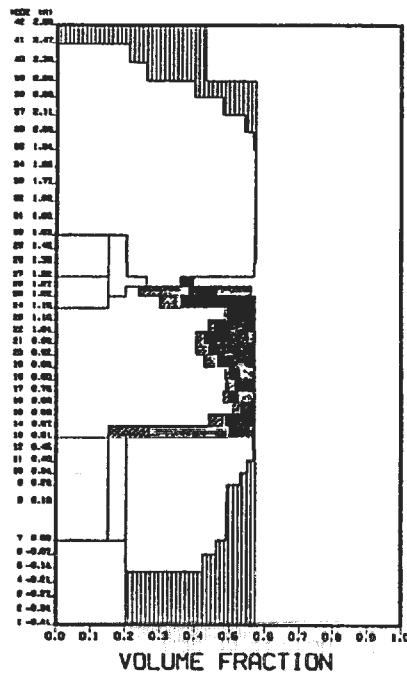


TOP 1000 ms

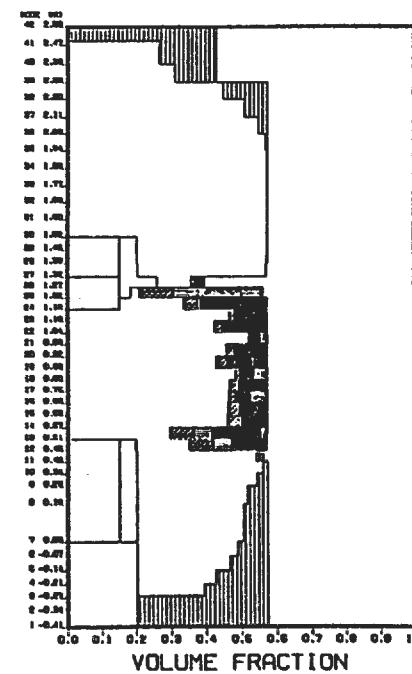


E13 JAM

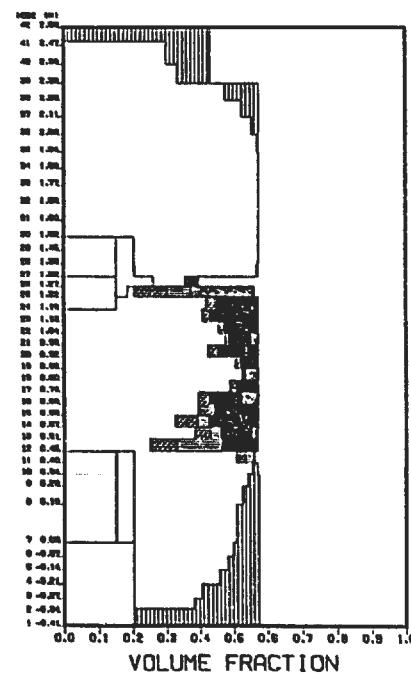
TOP 800 ms



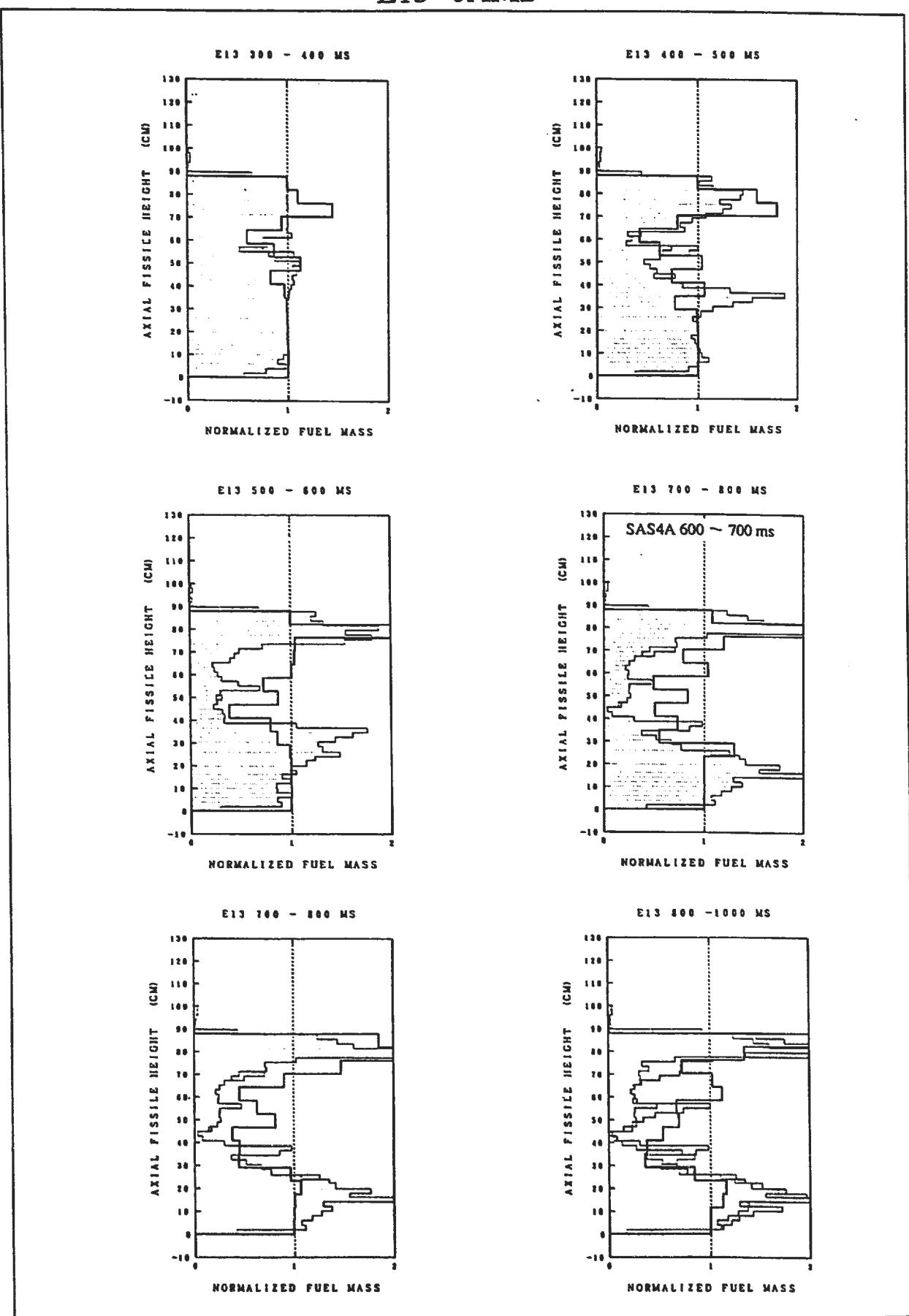
TOP 900 ms



TOP 1000 ms



## E13 JAM2

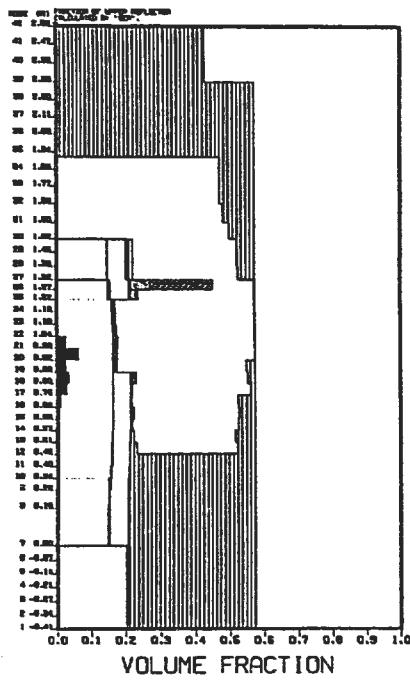


## E13 BASE

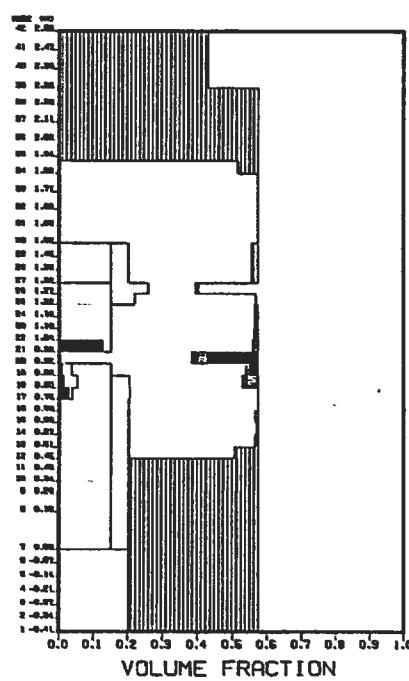
< LEGEND >

- MOLTEN FUEL
- REFRZENED FUEL
- CHUNK FUEL
- MOLTEN STEEL
- CHUNK STEEL

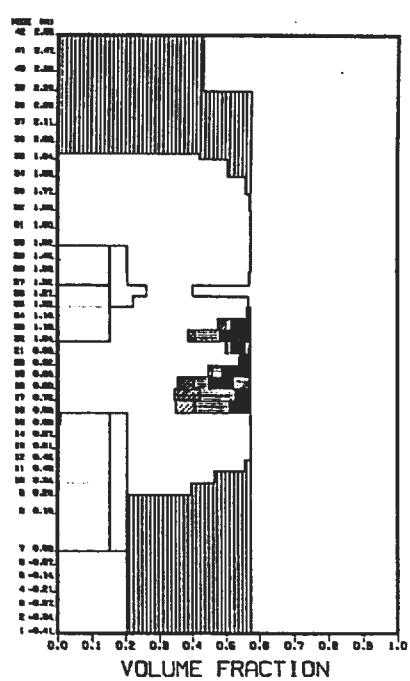
TOP 300 ms



TOP 301 ms

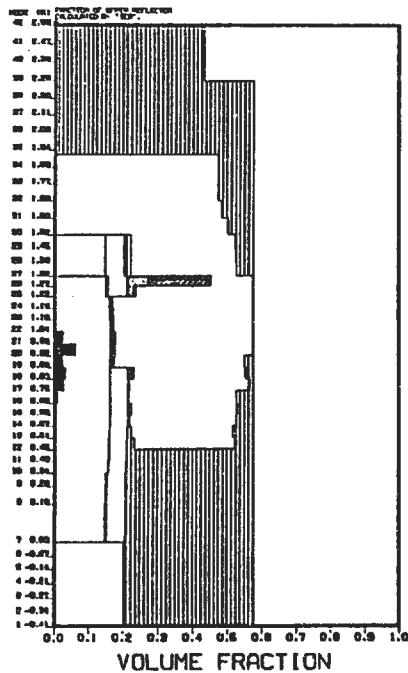


TOP 400 ms

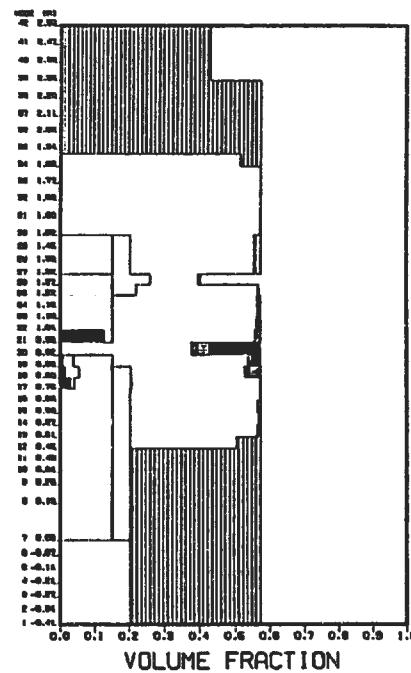


## E13 JAM2

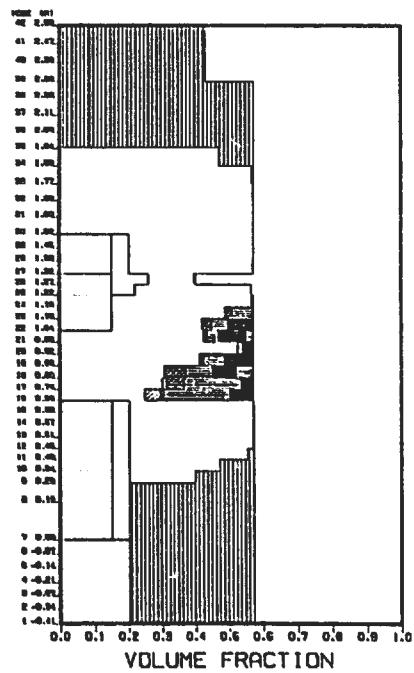
TOP 300 ms



TOP 301 ms

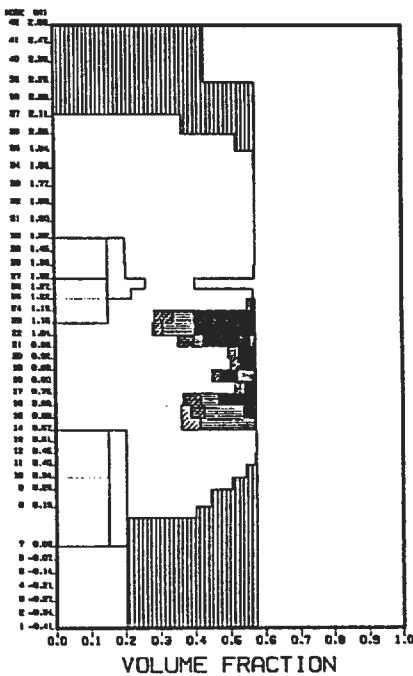


TOP 400 ms

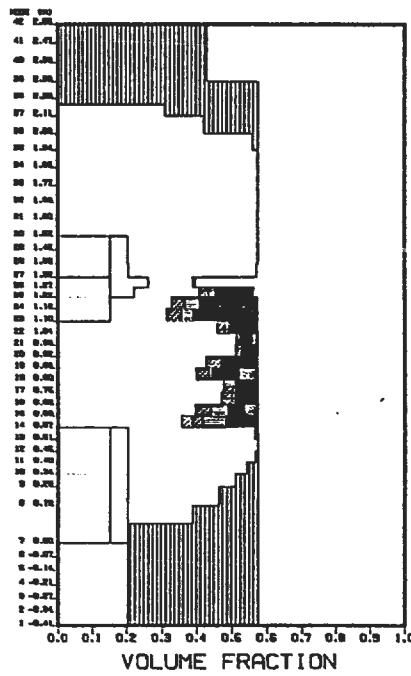


## E13 BASE

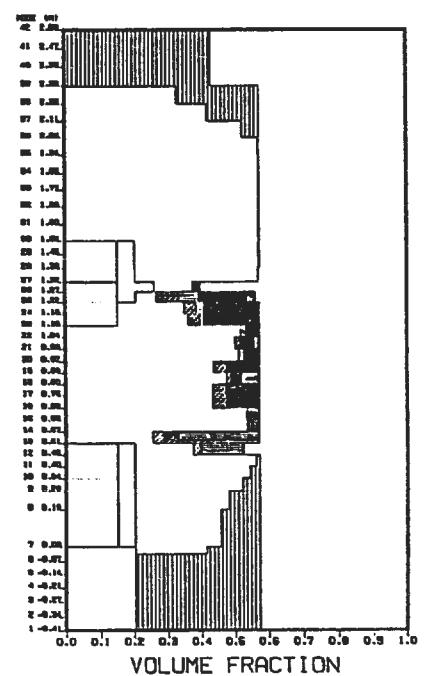
TOP 500 ms



TOP 600 ms

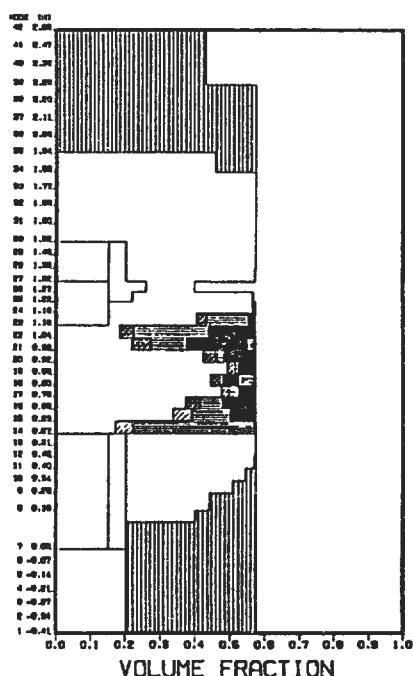


TOP 700 ms

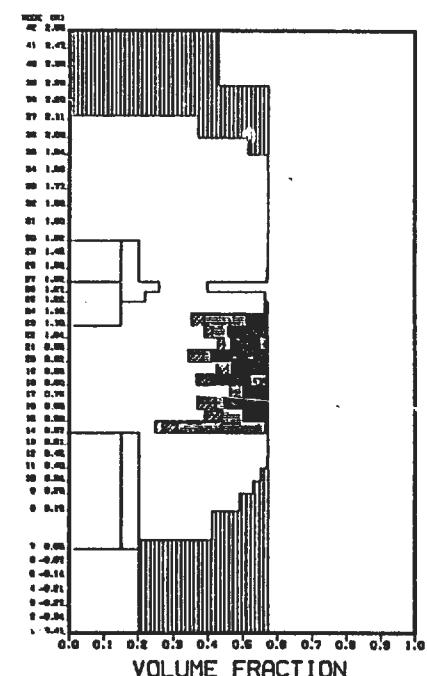


## E13 JAM2

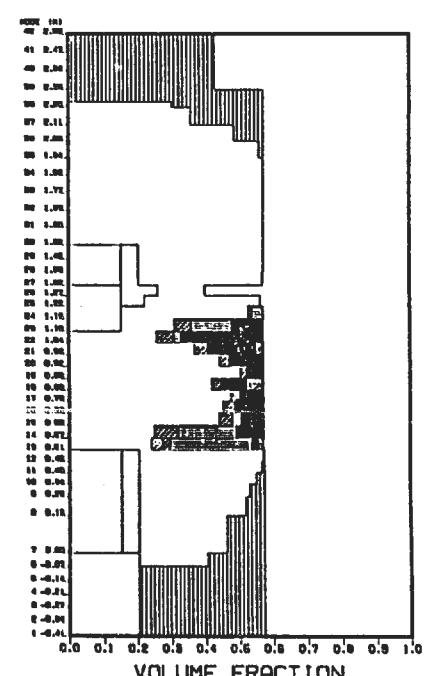
TOP 500 ms



TOP 600 ms

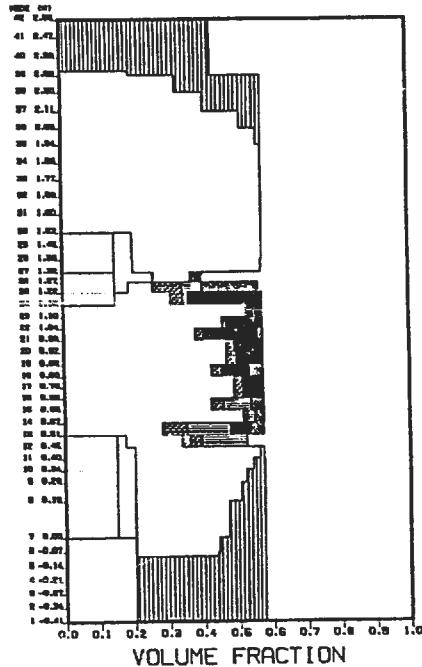


TOP 700 ms

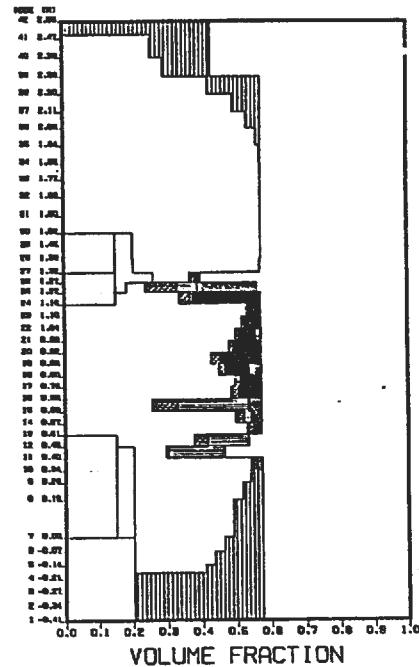


E13 BASE

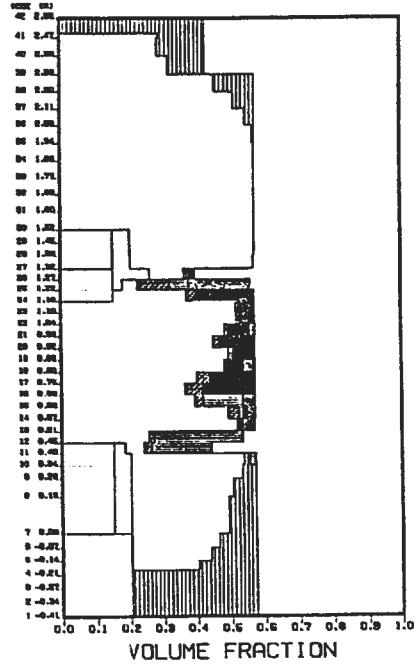
TOP 800 ms



TOP 900 ms

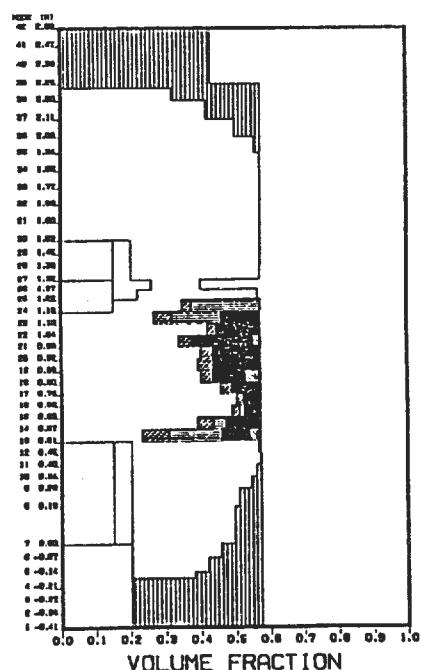


TOP 1000 ms

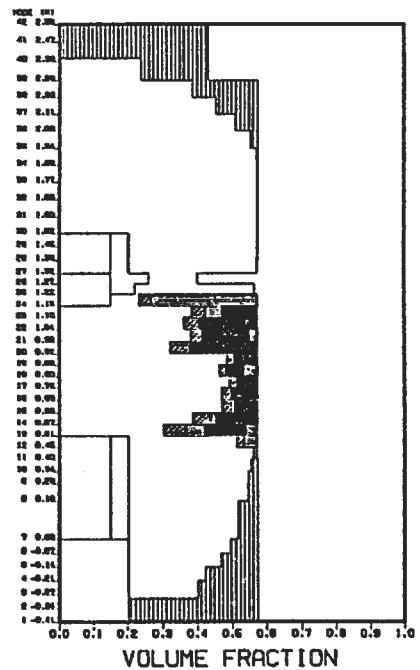


E13 JAM2

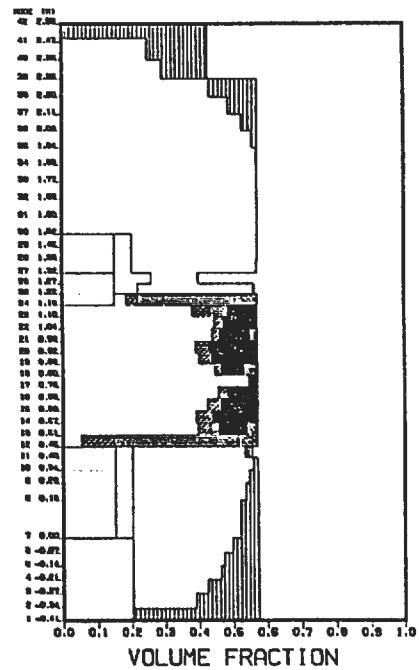
TOP 800 ms



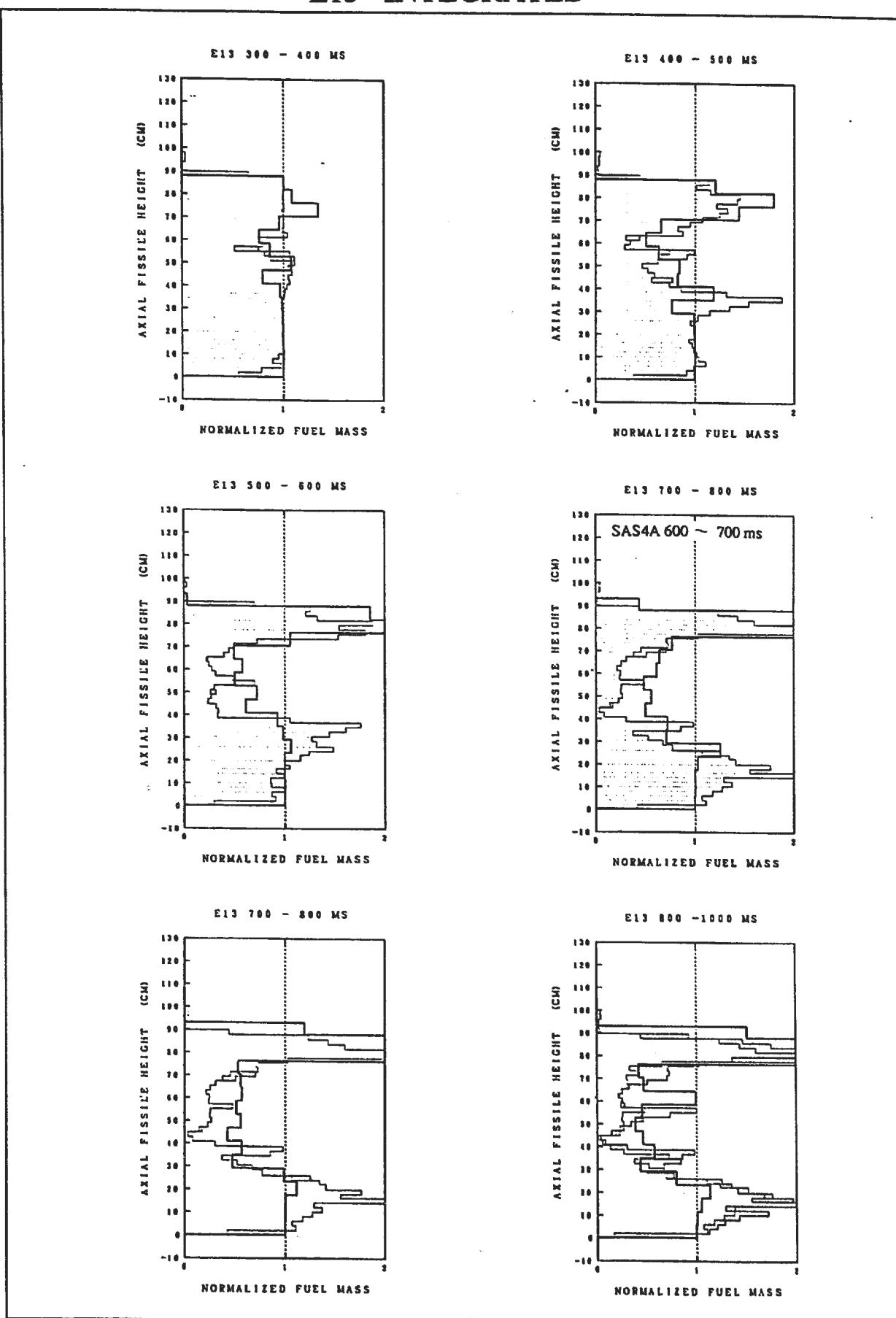
TOP 900 ms



TOP 1000 ms

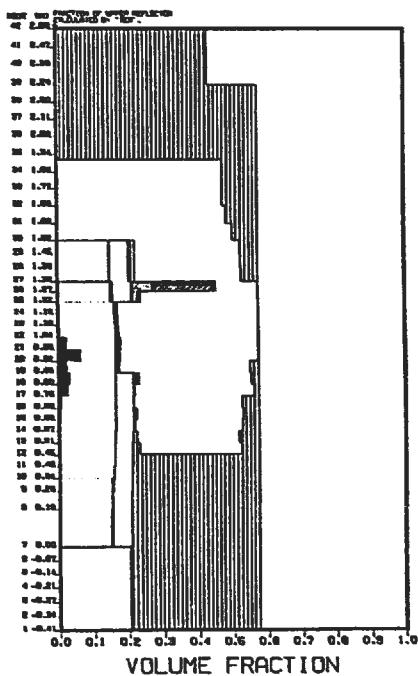


## E13 INTEGRATED

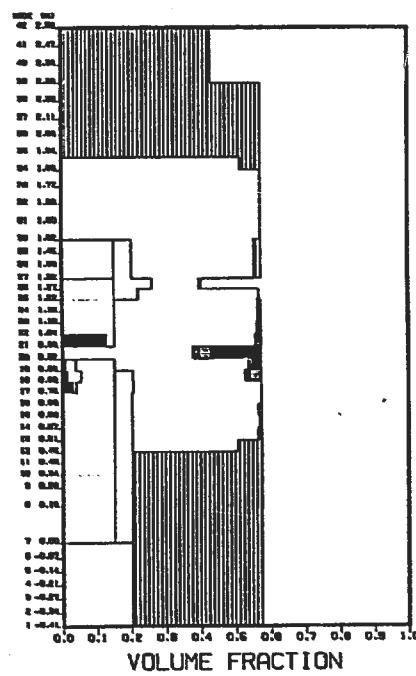


## E13 JAM2

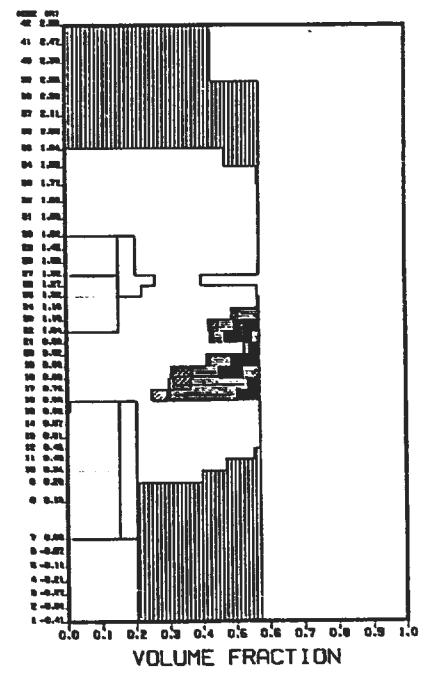
TOP 300 ms



TOP 301 ms

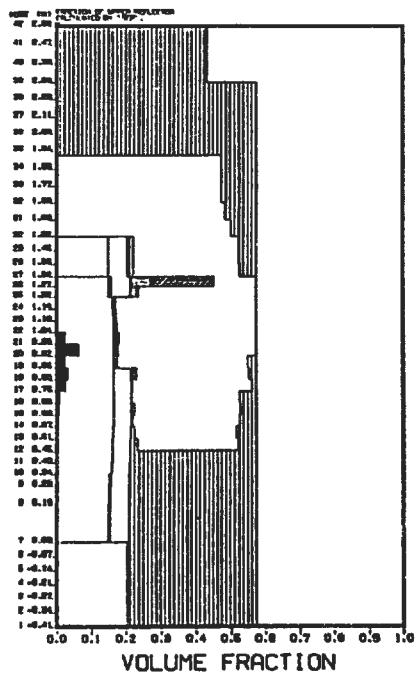


TOP 400 ms

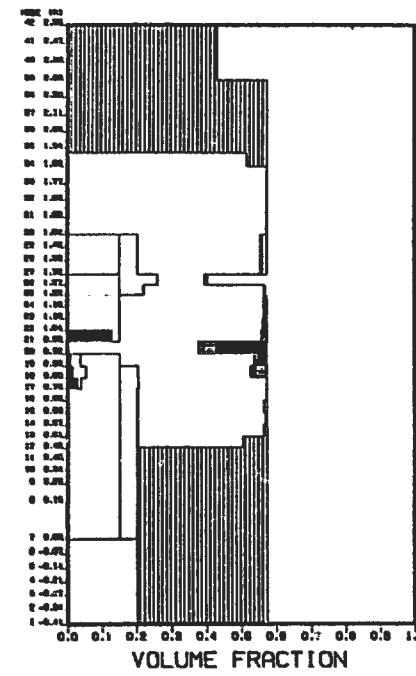


## E13 INTEGRATED

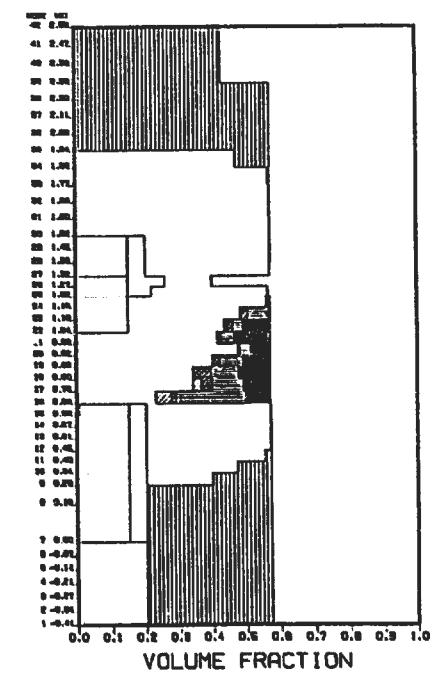
TOP 300 ms



TOP 301 ms

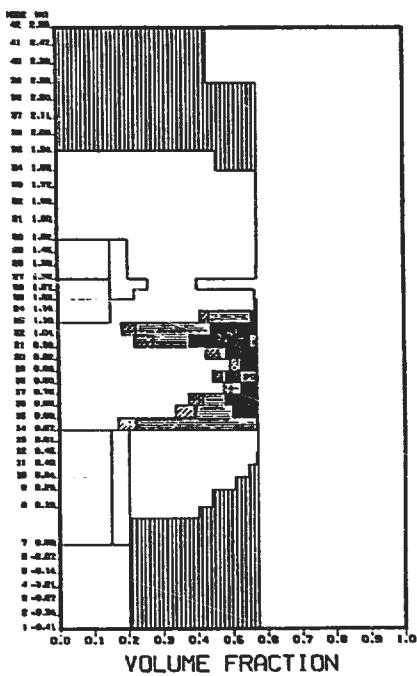


TOP 400 ms

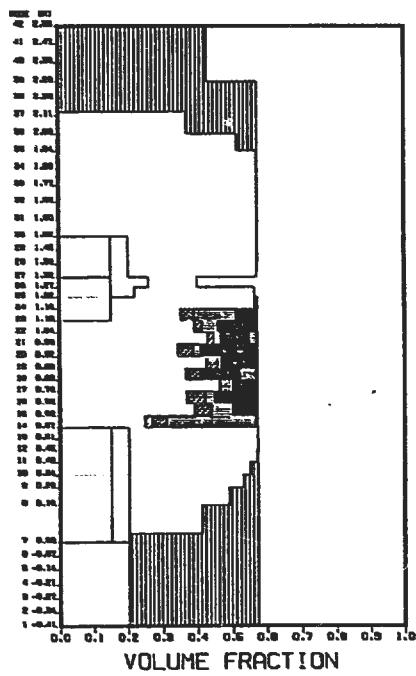


E13 JAM2

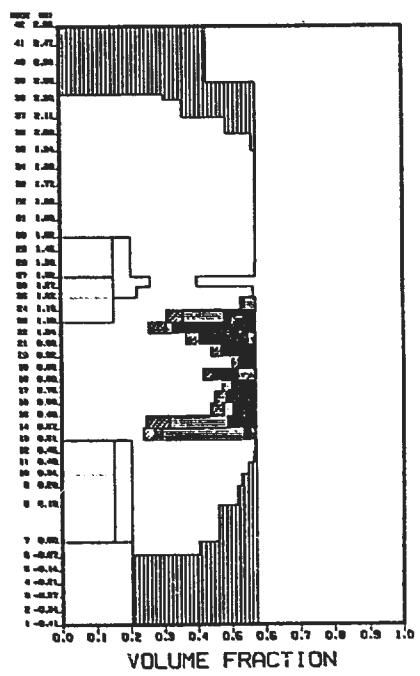
TOP 500 ms



TOP 600 ms

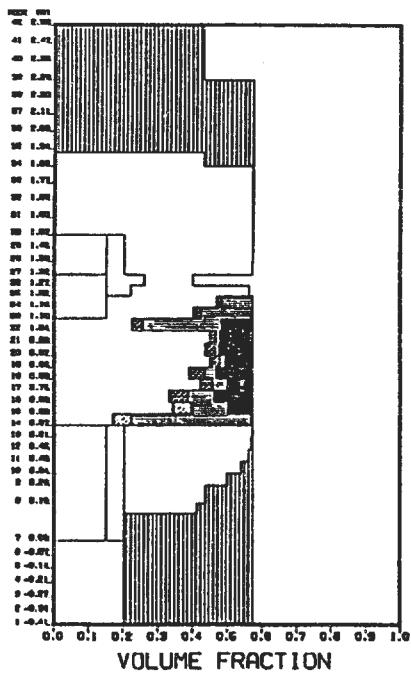


TOP 700 ms

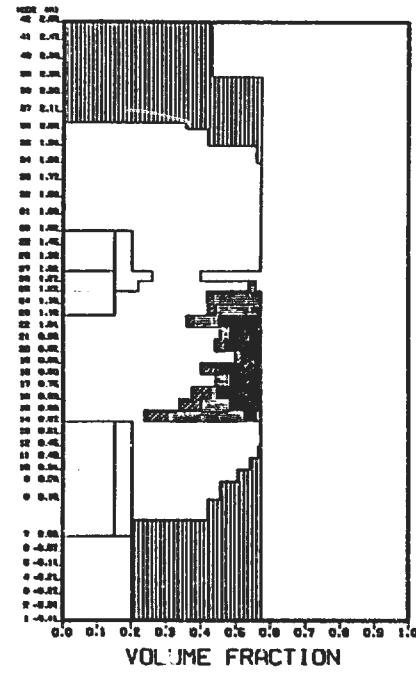


E13 INTEGRATED

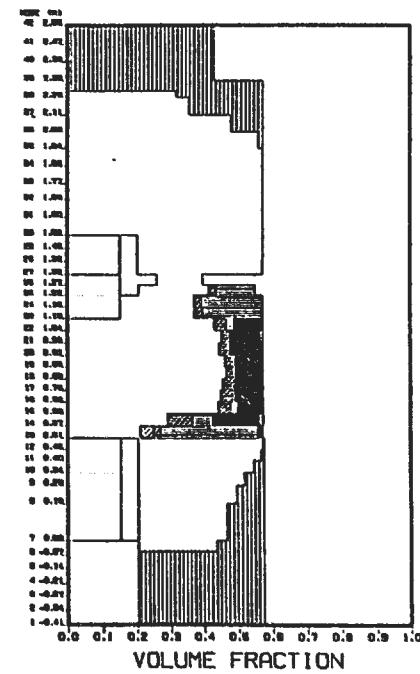
TOP 500 ms



TOP 600 ms

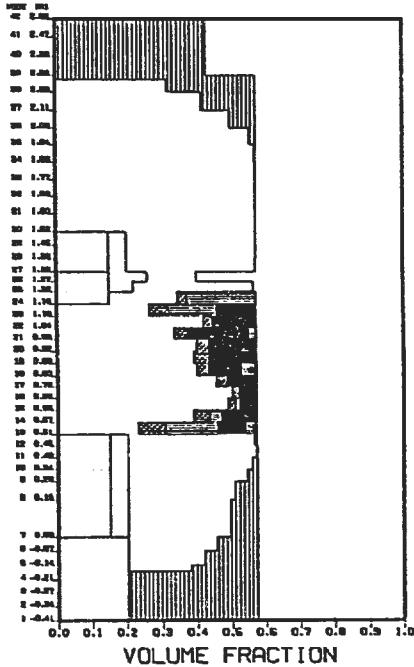


TOP 700 ms

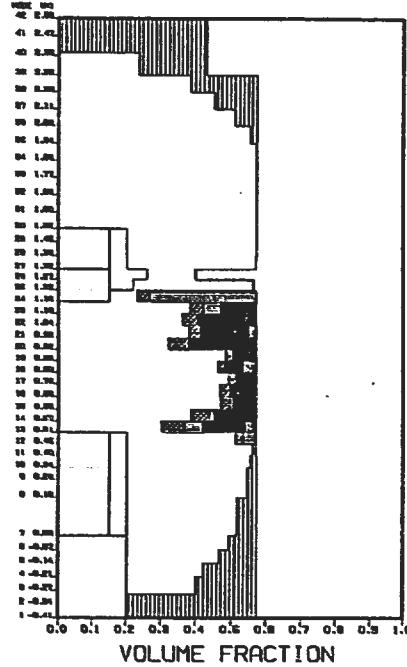


E13 JAM2

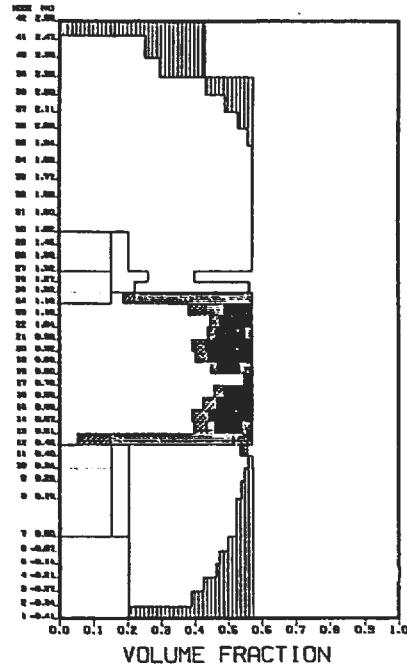
TOP 800 ms



TOP 900 ms

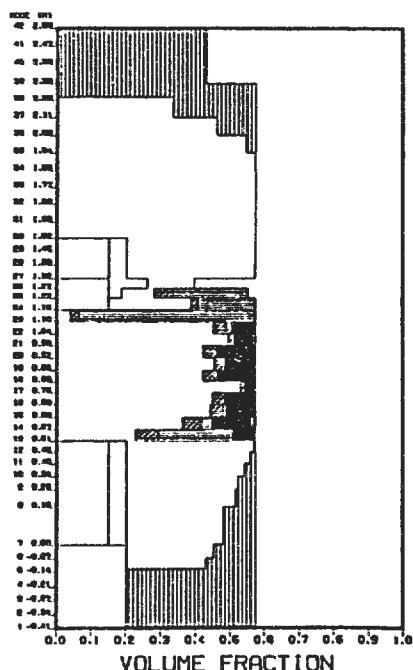


TOP 1000 ms

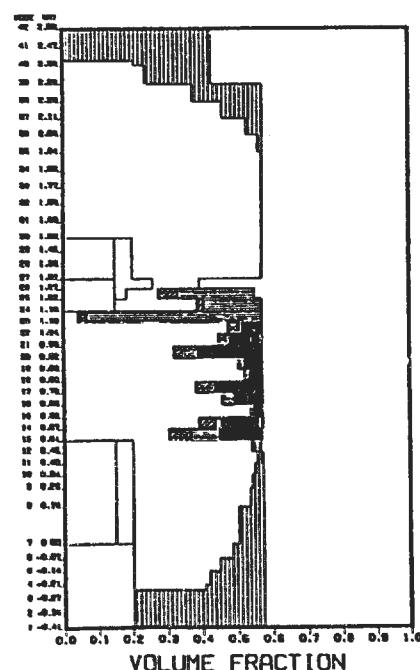


E13 INTEGRATED

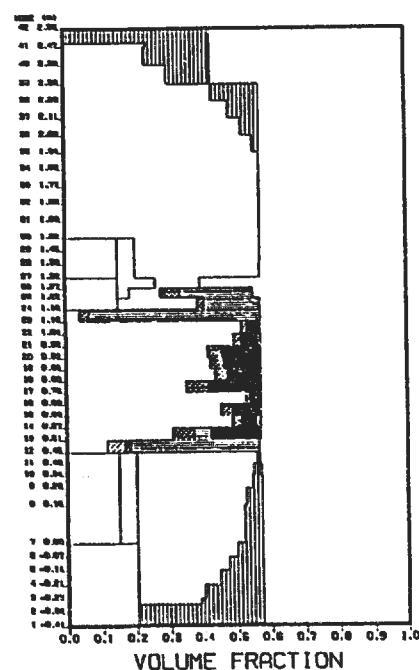
TOP 800 ms



TOP 900 ms



TOP 1000 ms



### 第 III 部

# Reactor Application Study

4th SAS4A Specialist Meeting  
October 6-8, 1993  
KfK, Germany

H. NIWA, PNC/OEC

## Contents

- 1. Analytical cases of 600 MWe core (30 Chs.)**
- 2. Results of base case and other cases**
- 3. Concluding remarks**

## 1. Analytical cases of 600 MWe core (30 Chs.)

**Scoping calculations of large scale reactors with higher void reactivity**

**600 MWe core : Axial fissile height = 1 m, Max. void reactivity = \$4.4,**

**Doppler coefficient =  $-9.46 \times 10^{-3}$  [T dk/dT],**

**$\tau_{1/2} = 5.5$  sec, diameter of pin = 8.5 mm (annular),**

**217 pins x 248 subassemblies, 3 batches**

**30 SAS channels**

**Neutronics data was prepared by DIF3DS/SAS3D iterative calculation**

1  
8  
-

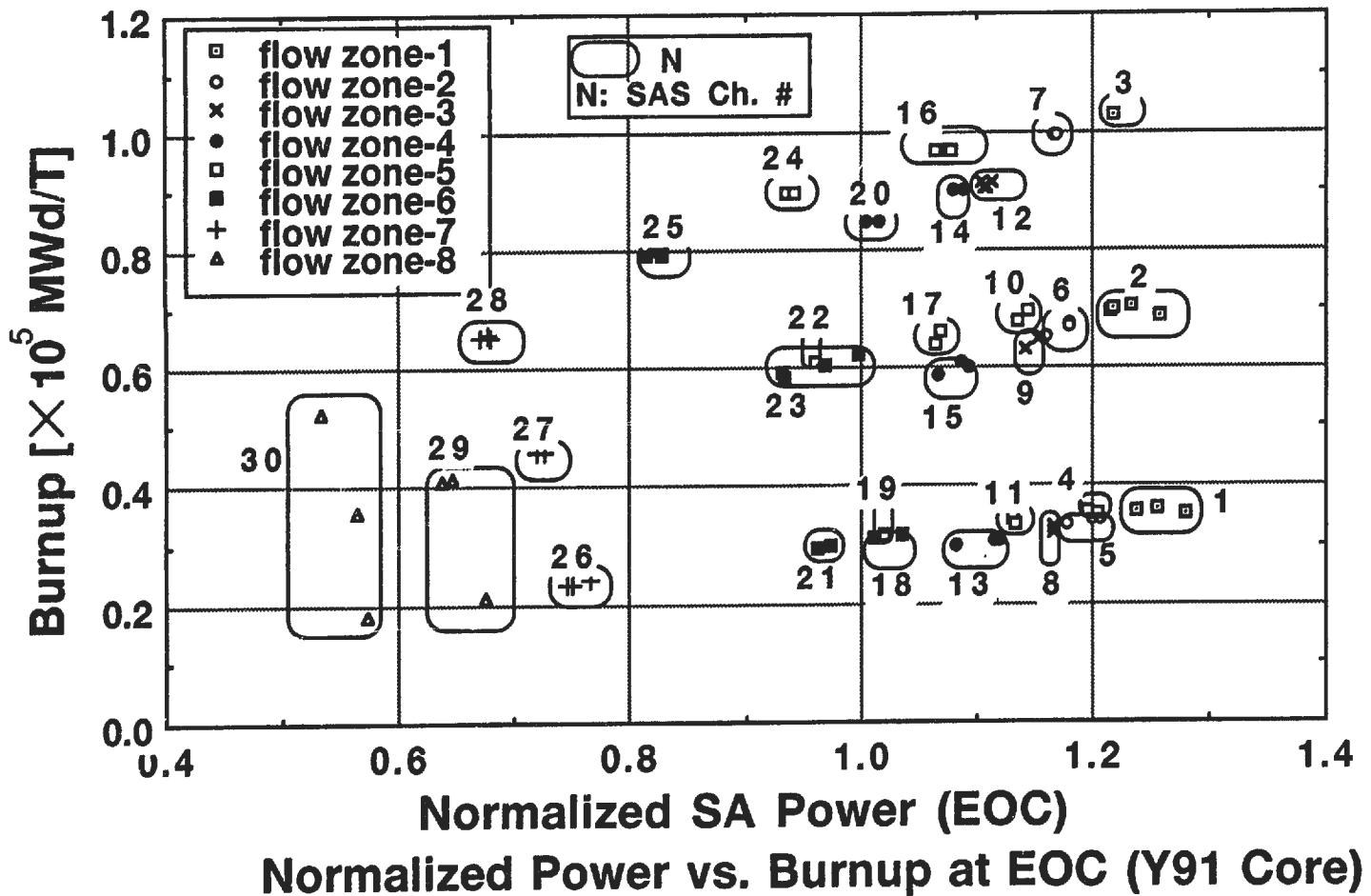
**BASE:** Jamming model is not used.

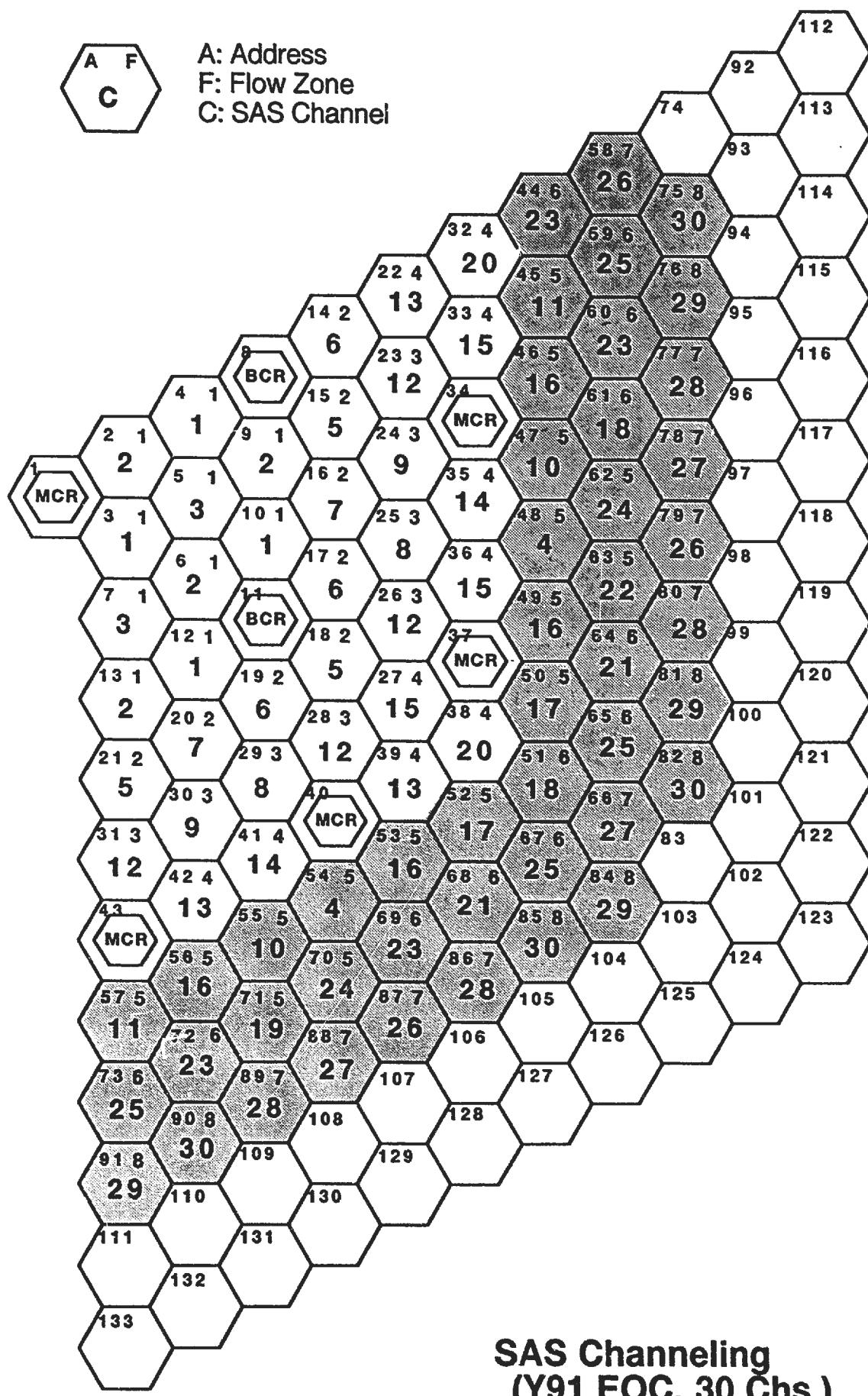
**JAM1:** Chunk jamming due to high volume fraction (60%) is taken into account (JAMMOD=1). Breakup of jamming is not taken into account.

**JAM3:** Chunk jamming at contraction point etc. are considered.  
(JAMMOD=3) Breakup of jamming is not taken into account.

**LOWEOFF:** JAM3 but jamming due to low-enthalpy chunk is omitted.

**JAMBREAK:** LOWEOFF and breakup of jamming is taken into account.





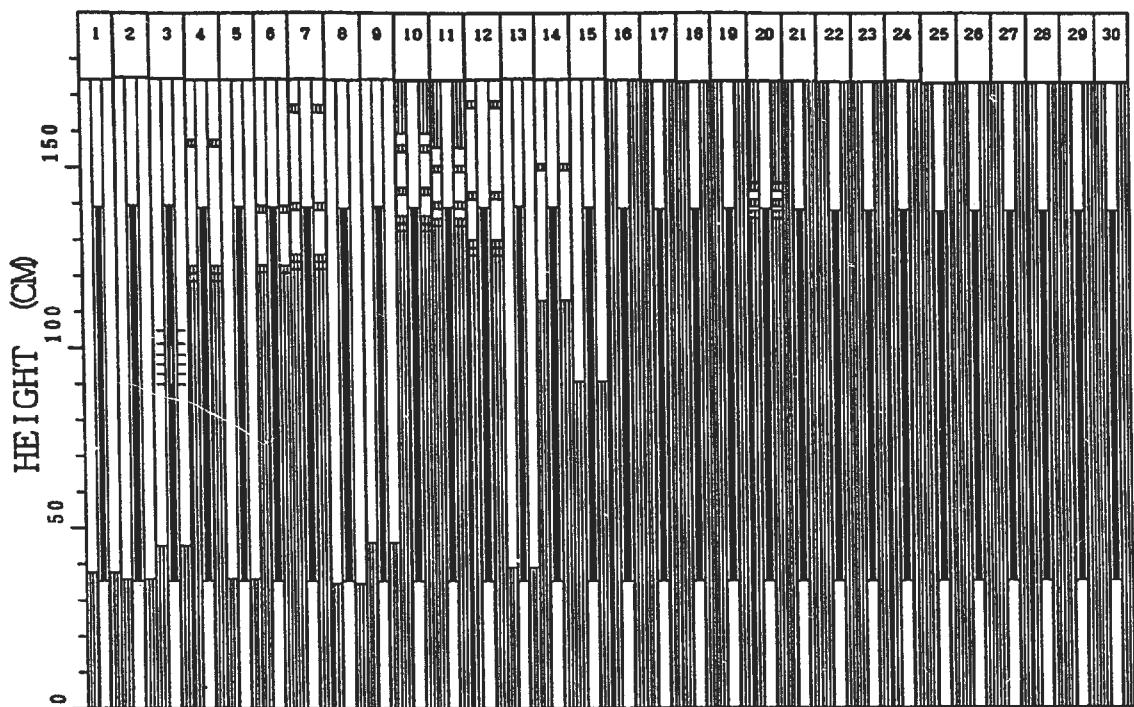
## 2. Results of base case and other cases

### BASE case results:

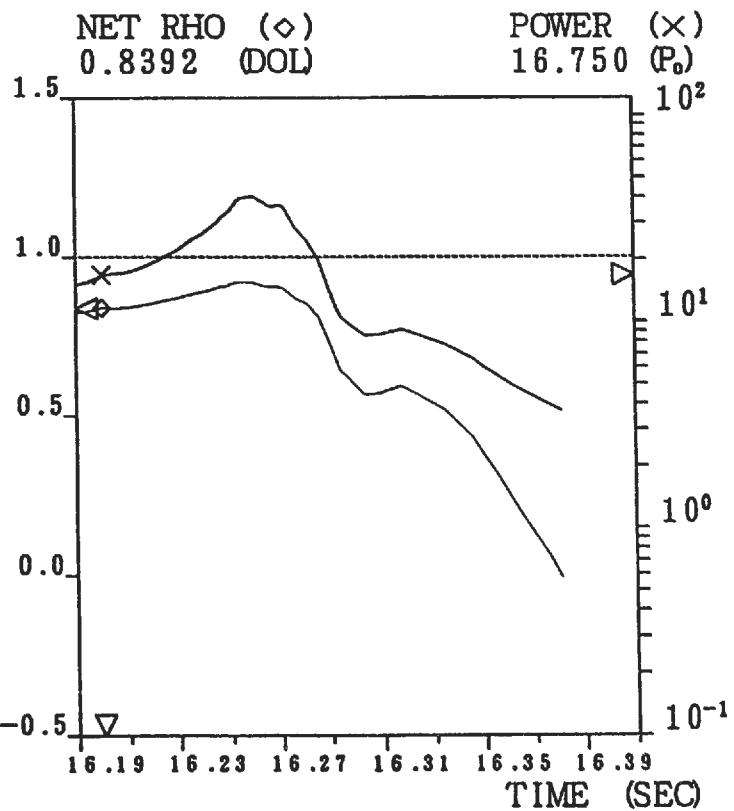
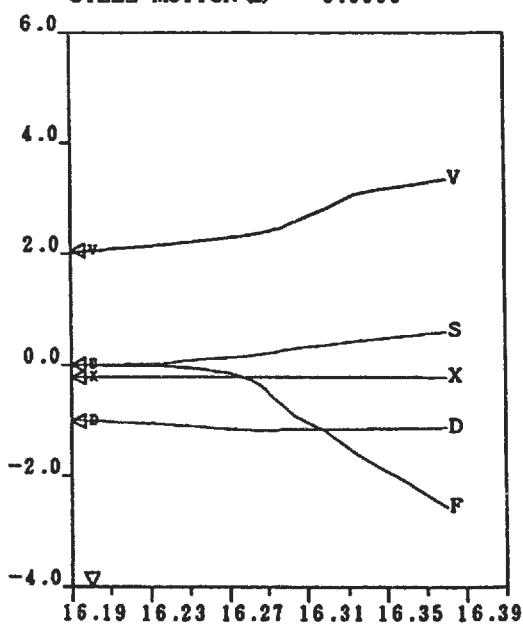
	time [s]	power [Po]	$\rho_{net}$	$\rho_{Dop}$	$\rho_{dens}$	$\rho_{cool}$	$\rho_{fuel}$	Tf.ave [K]
boiling	14.21	0.996	-0.007	-0.220	-0.091	0.290	0	1660
1st fail.	16.195	16.2	0.827	-1.013	-0.223	2.036	0	2397
peak power	16.259	40.3	0.919	-1.135	-0.229	2.253	-0.094	2575
1st PLUTO	16.286	19.9	0.812	-1.188	-0.232	2.377	-0.353	2659
final step	16.381	3.7	-0.008	-1.147	-0.235	3.339	-2.573	2683

- (1) at 1st failure (Ch.3)
- (2) 90ms after failure Effective fuel dispersal in the leading SA's (Ch.3, Ch.1) reduces  $\rho_{net}$ . But chunk sweepout is observed in Ch.1. Note that peak power (40 Po) in the leading channels corresponds to 4 kJ/g/s and 0.2 kJ/g is injected from failure to +70 ms, which is less than CABRI-1 BGS4 case.
- (3) Non-energetic sequence seems to be transferred to the transition phase with remaining sodium-rich region at core periphery. But the fuel configuration in the UAB region may not true because of the excessive chunk sweepout.

STEP = 434  
 TIME = 16.2000 (SEC) (1)  
 NUMBER BY CHANNEL



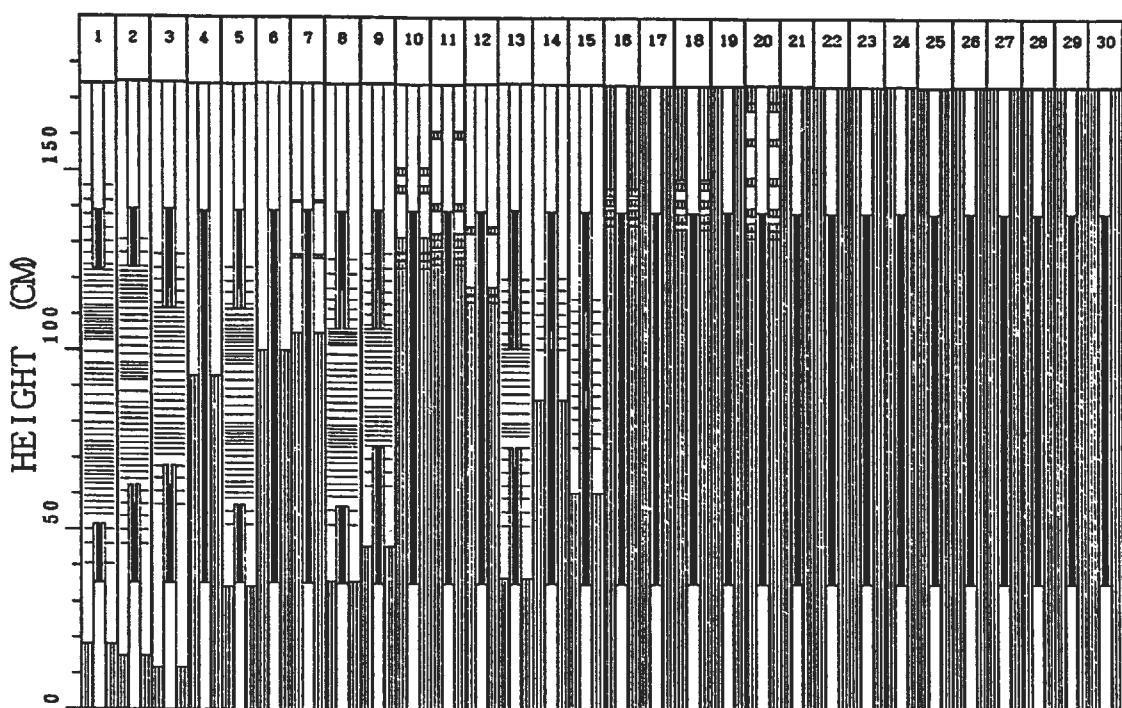
FUEL MOTION ( $\theta$ ) = 0.0023  
 VOID ( $V$ ) = 2.0532  
 DOPPLER ( $\phi$ ) = -1.0195  
 FUEL DENSITY CO = -0.2231  
 STEEL MOTION ( $S$ ) = 0.0000



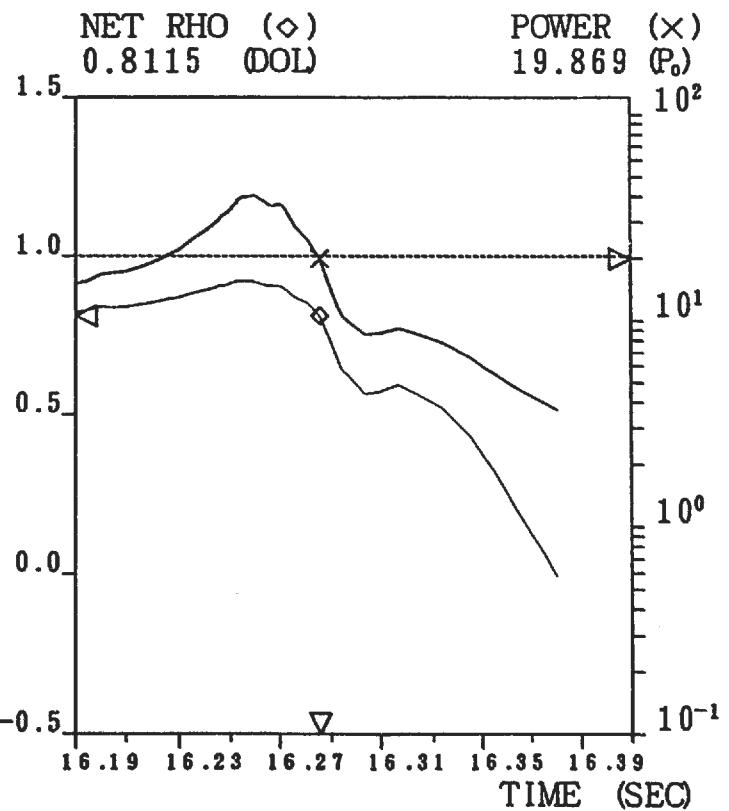
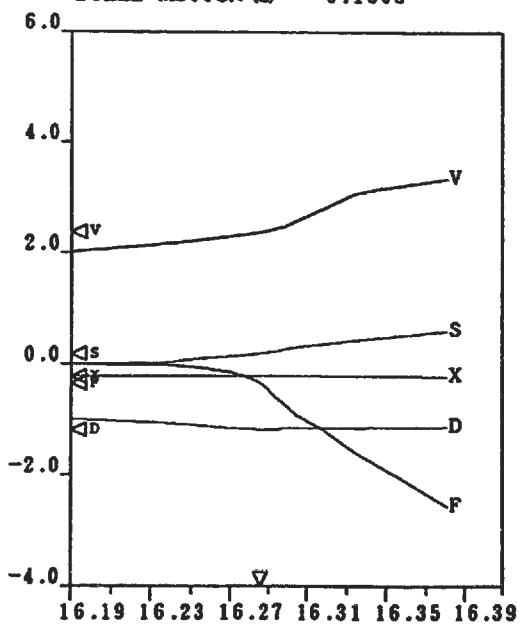
SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

STEP = 473  
 TIME = 16.2855 (SEC)  
 NUMBER BY CHANNEL

(2)



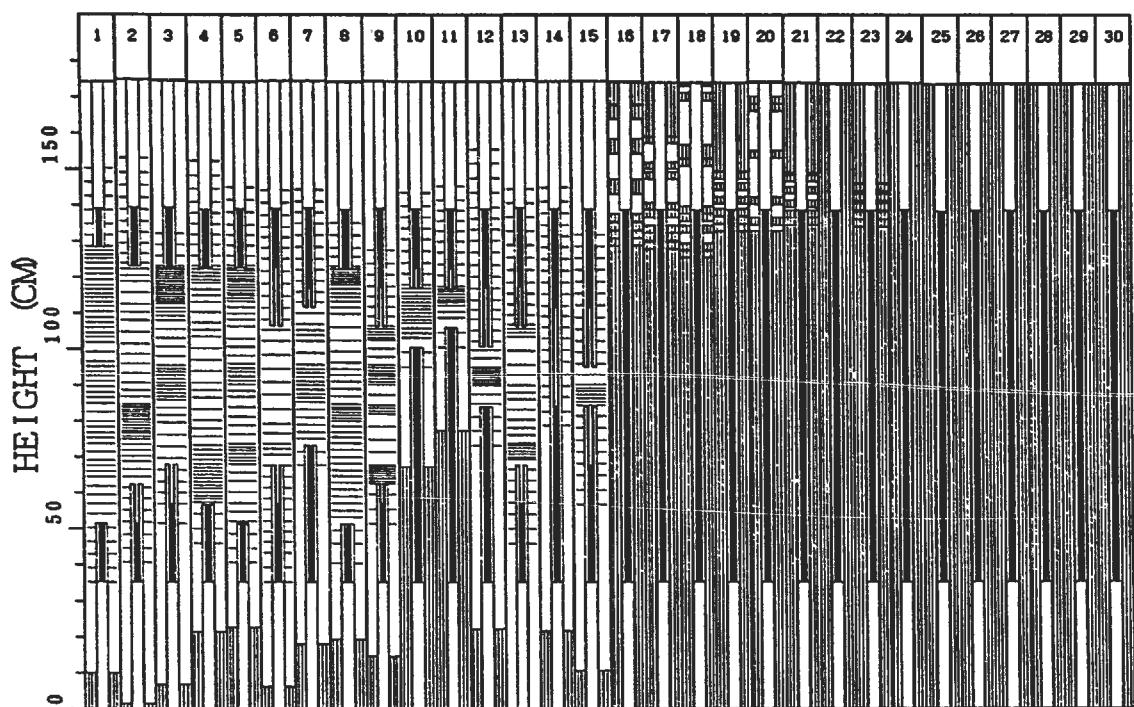
FUEL MOTION (F) = -0.3533  
 VOID (V) = 2.3774  
 DOPPLER (D) = -1.1881  
 FUEL DENSITY (D) = -0.2320  
 STEEL MOTION (S) = 0.1808



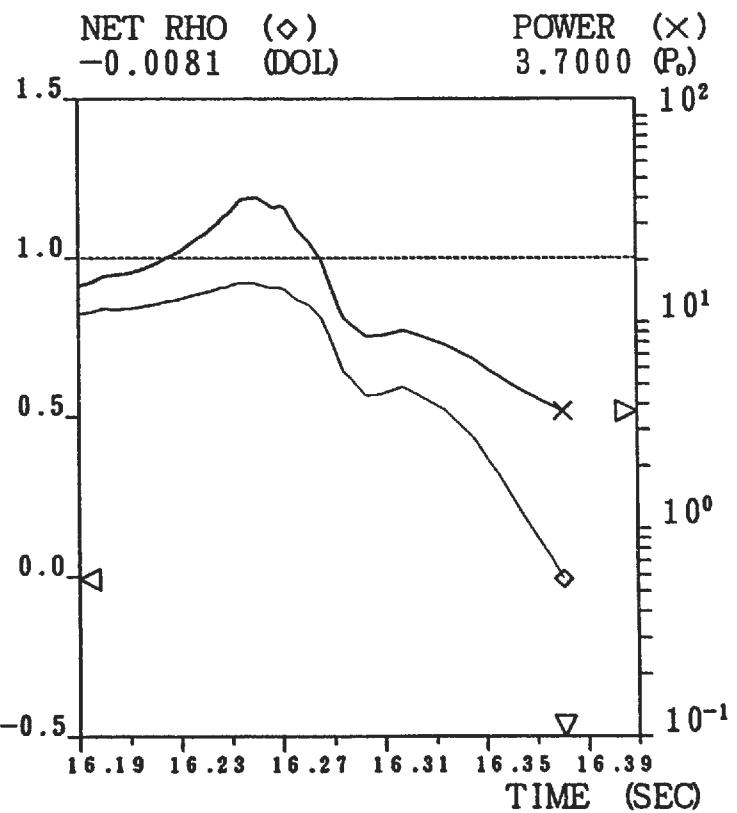
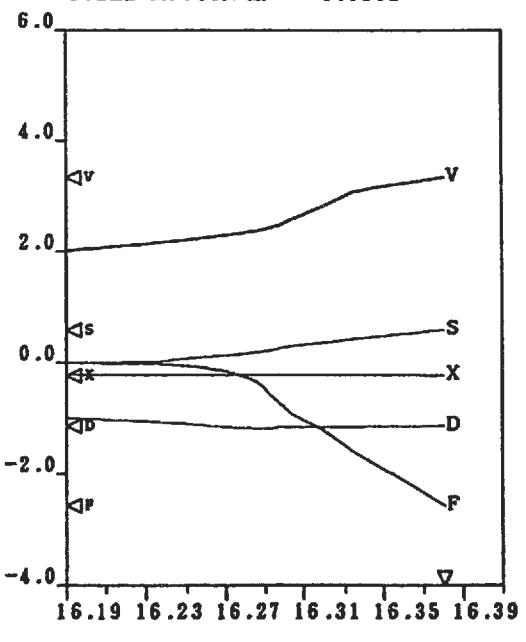
SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

STEP = 490  
 TIME = 16.3806 (SEC)  
 NUMBER BY CHANNEL

(3)



FUEL MOTION (F) = -2.5726  
 VOID (V) = 3.3393  
 DOPPLER (D) = -1.1465  
 FUEL DENSITY (O) = -0.2351  
 STEEL MOTION (S) = 0.5801



SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

Other cases are compared with BASE case.

Net reactivity

Power

Fuel motion reactivity

Core average fuel temperature

**JAM1 case (jamming if volume fraction of chunk exceeding 60%)**

Fuel dispersal is slower than BASE case, but chunk penetration is still observed.

**JAM3 case (JAMMOD=3, no breakup of jamming)**

Fuel dispersal is much delayed than JAM1 because of jamming of low-enthalpy fuel. This leads to rather high burst (max is 300 Po), and core average temperature reaches 3000 K.

In a reactor case, solid fuel shell at disruption is sufficiently below solidus level because of no flux depression. However, chunks are embedded in molten fuel in bundle geometry. Therefore it could be thought that chunks can move from the beginning of disruption.

**LOWEOFF case (JAM3 but low energy chunk jamming is off)**

Initial fuel dispersal is successfully done, but jamming restricts continuous fuel dispersal then finally causes rather high burst similar to JAM3.

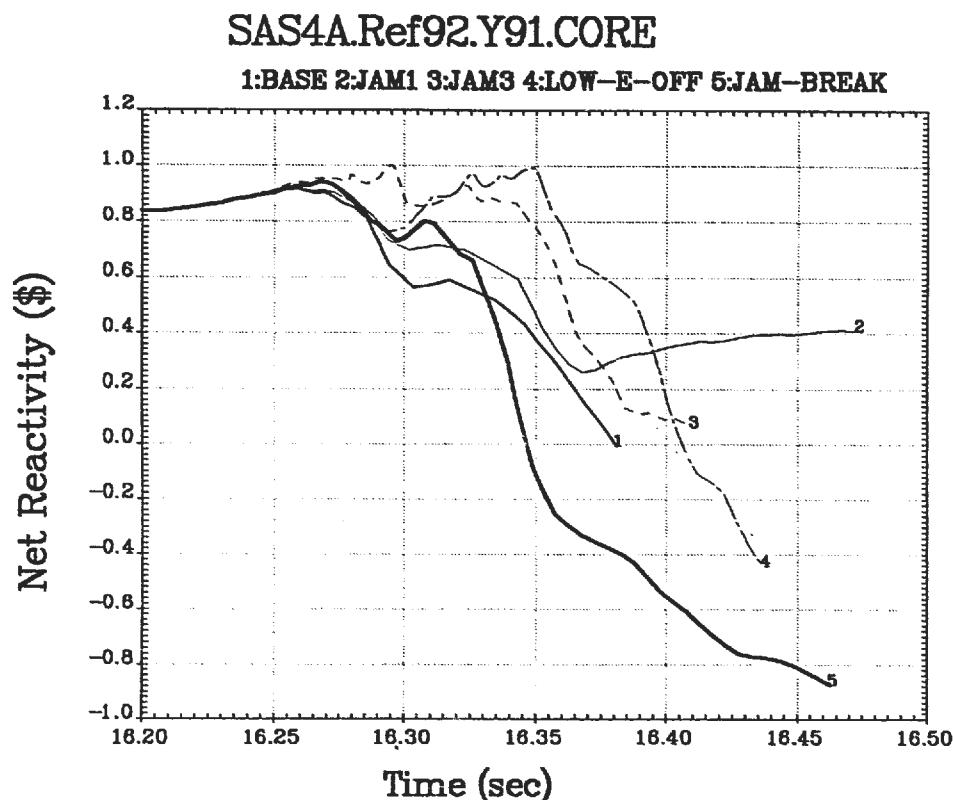
Channel 4 is a typical channel of jamming. Its channel pressure at 16.32 s is more than 30 bars, therefore breakup of jamming could be expected.

**JAMBREAK case (LOWEOFF + breakup of jamming if  $\Delta P > 20$  bars)**

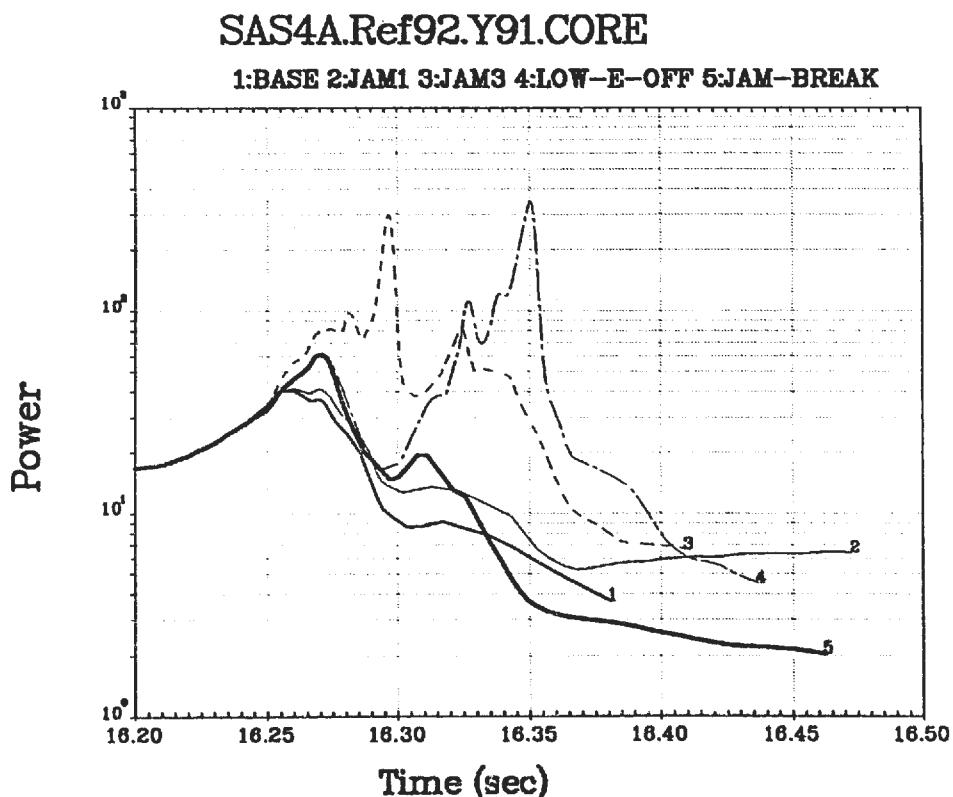
Breakup of jamming is predicted at 16.32 s in Ch.4, and also in other Channels. This allows fuel dispersal again, thus the second burst has disappeared.

Fuel dispersal in Ch. 4 is compared with that in LOWEOFF case. Chunk sweepout in JAMBREAK case may be excessive.

DATE : 83-09-30  
USED TOOL : POGSC/J.MATILDA.Y9209.LOAD(TWDIM#M3)



DATE : 83-09-30  
USED TOOL : POGSC/J.MATILDA.Y9209.LOAD(TWDIM#M3)

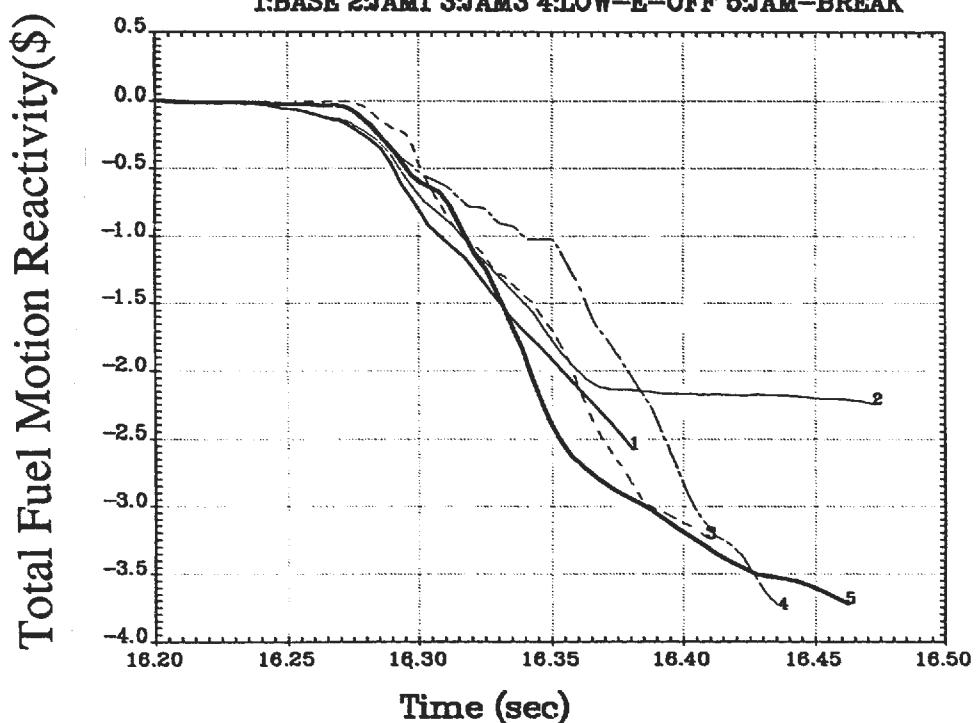


PNC TN9410 93-231

DATE : 93-09-30  
 USED TOOL : POC2CFF.MATILDA.Y920B.LOAD(TWDINHMS)

## SAS4A.Ref92.Y91.CORE

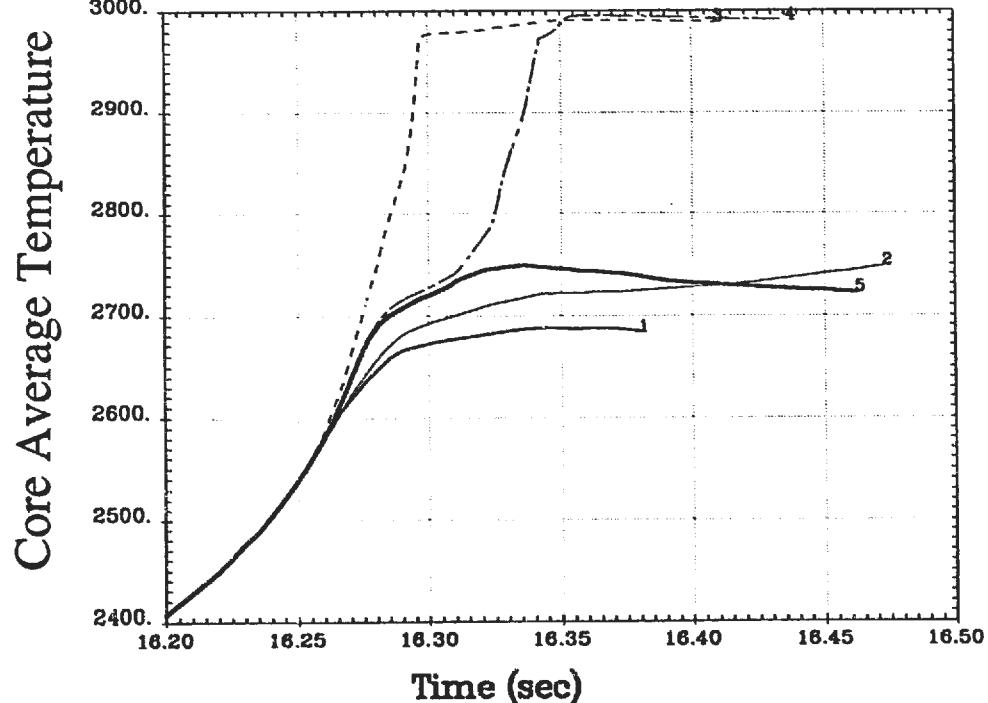
1:BASE 2:JAM1 3:JAMS 4:LOW-E-OFF 5:JAM-BREAK

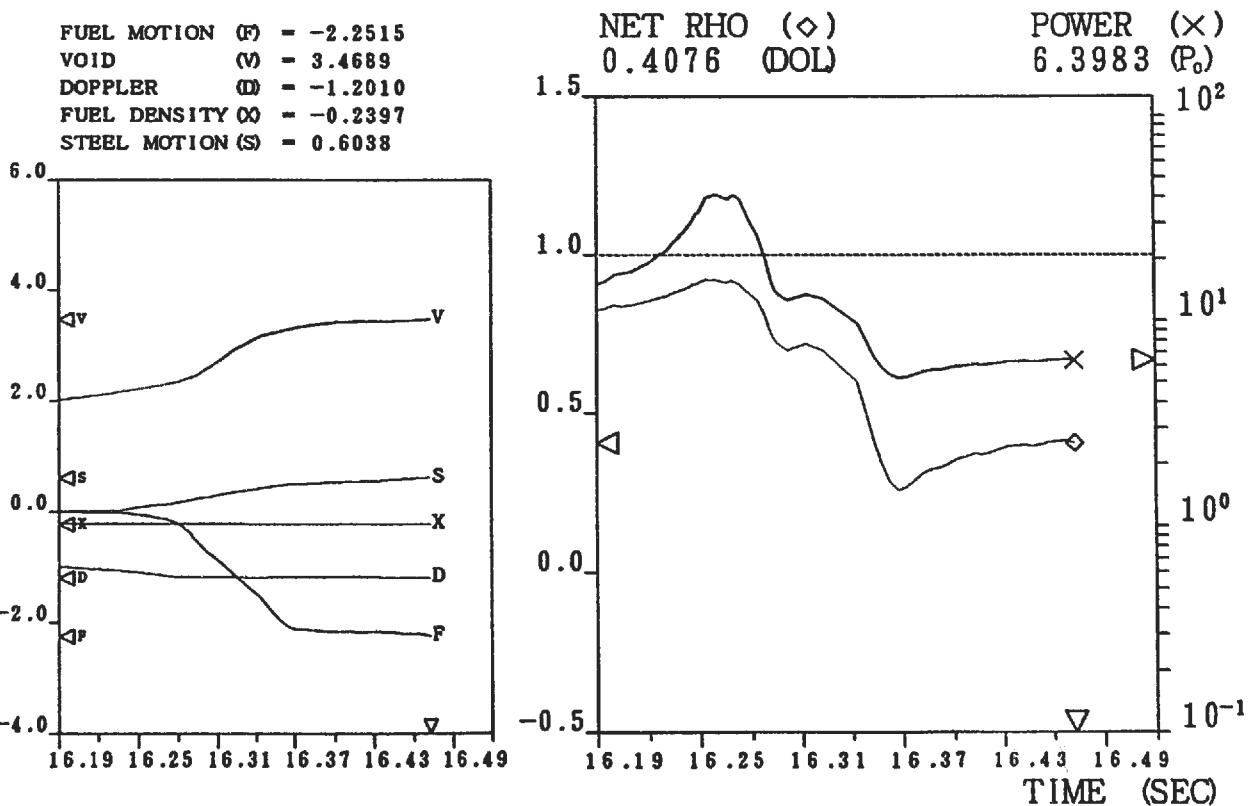
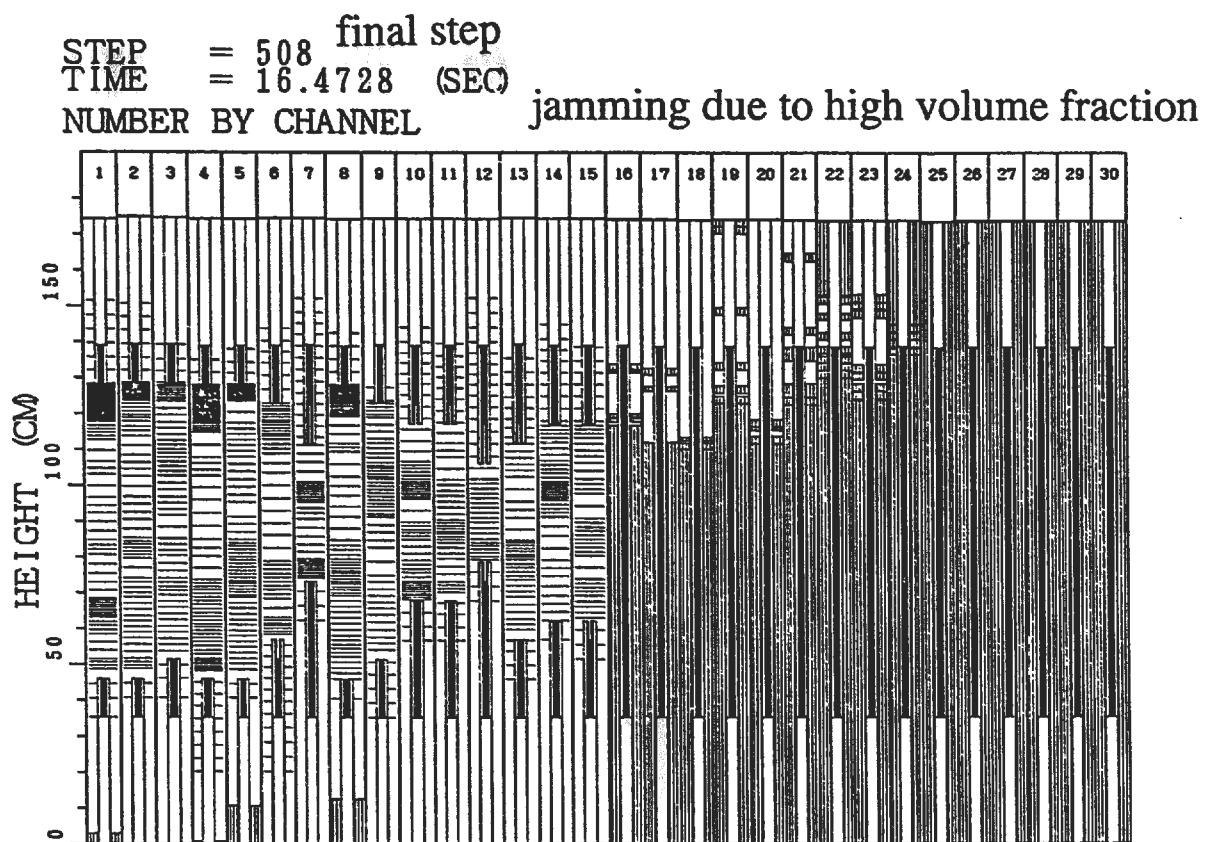


DATE : 93-09-30  
 USED TOOL : POC2CFF.MATILDA.Y920B.LOAD(TWDINHMS)

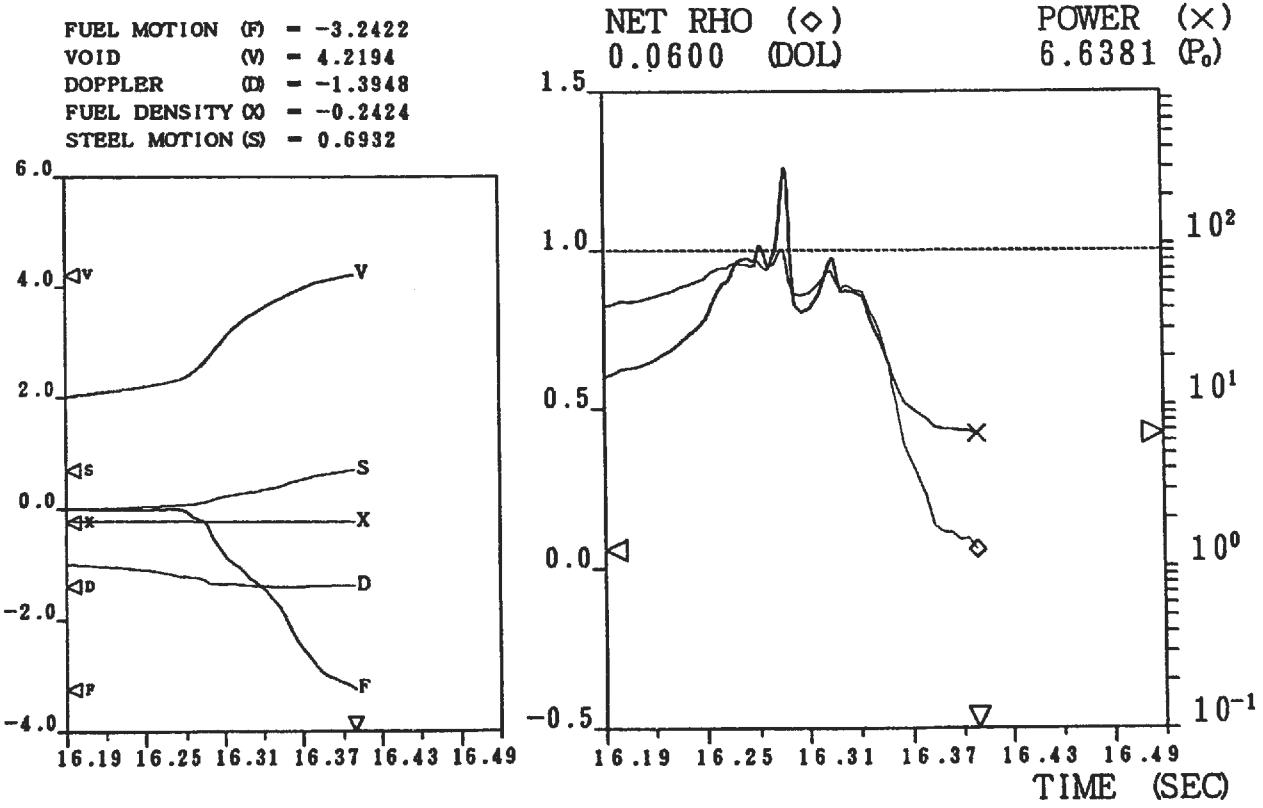
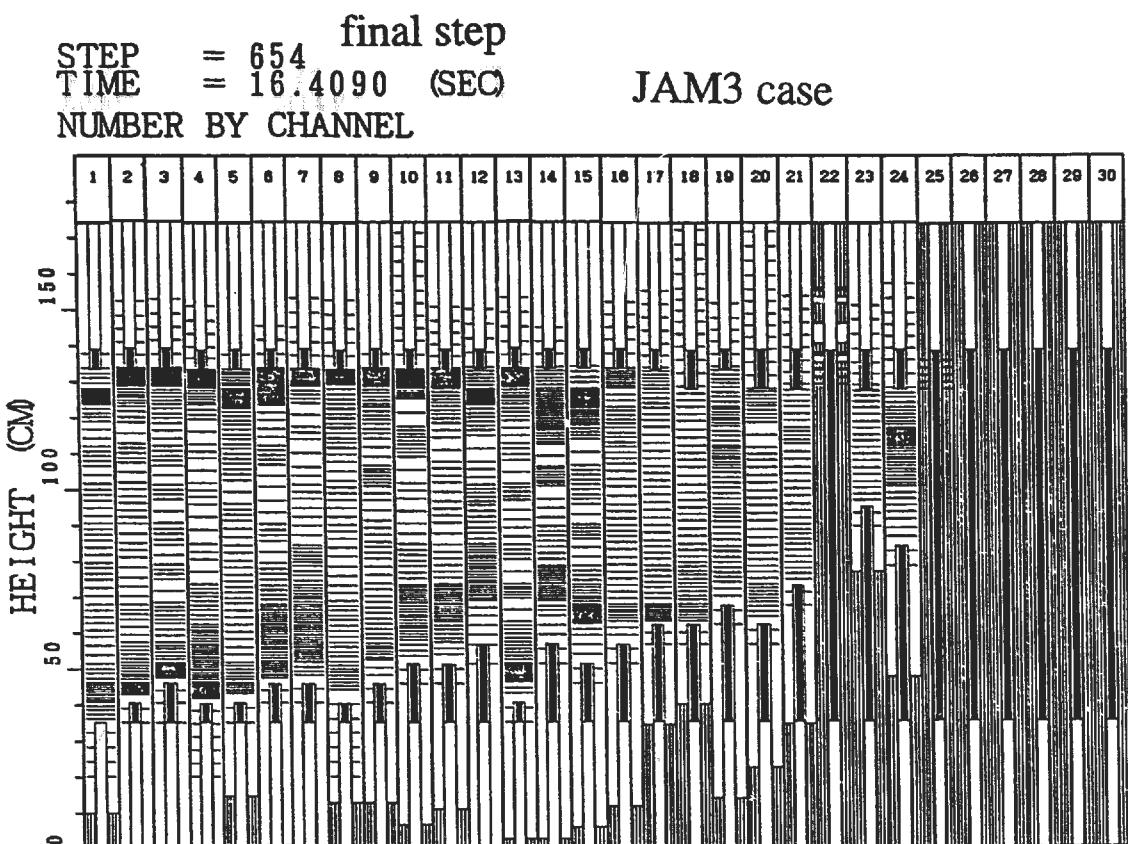
## SAS4A.Ref92.Y91.CORE

1:BASE 2:JAM1 3:JAMS 4:LOW-E-OFF 5:JAM-BREAK



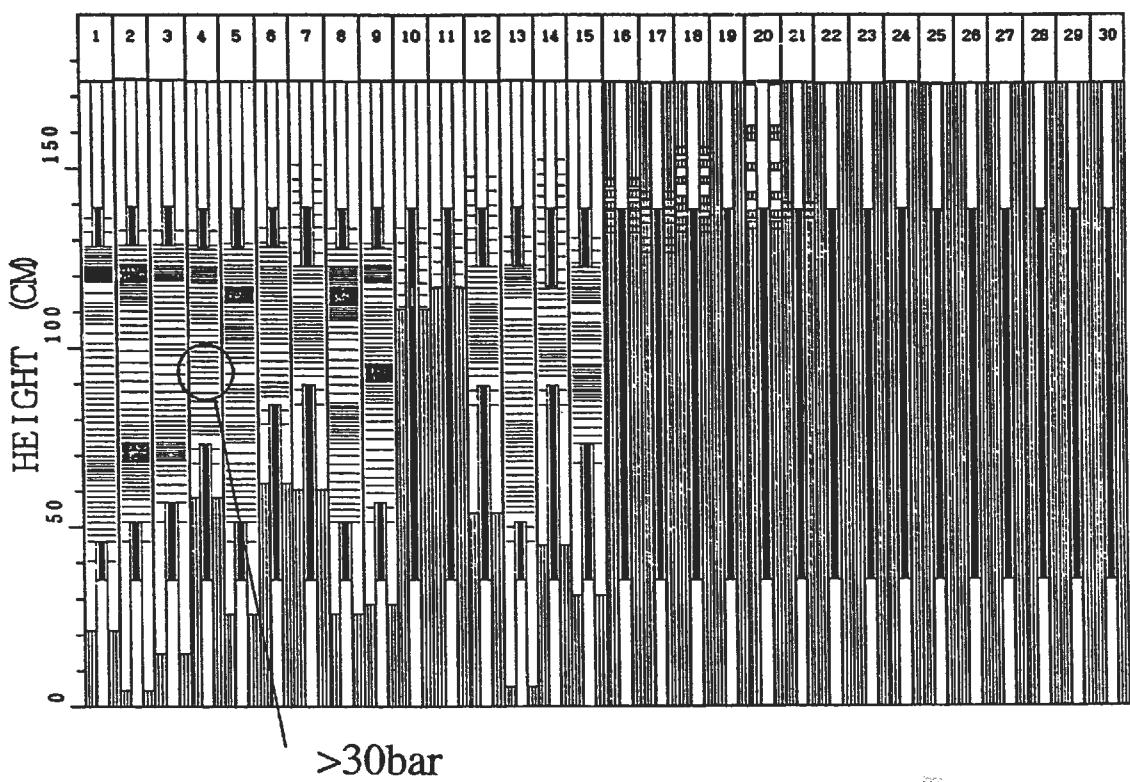


SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

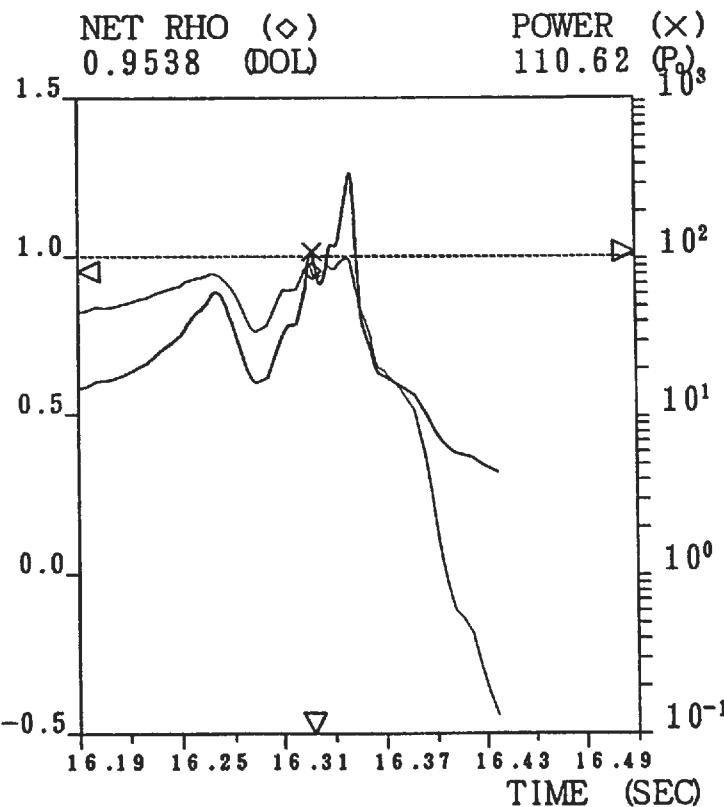
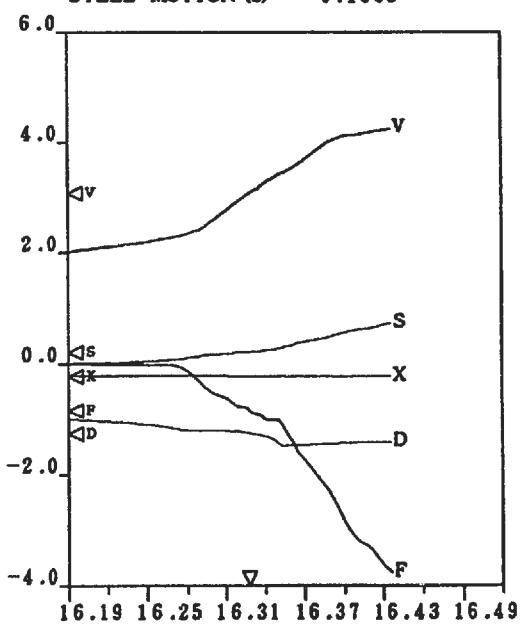


SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

STEP = 502  
 TIME = 16.3273 (SEC)  
 NUMBER BY CHANNEL

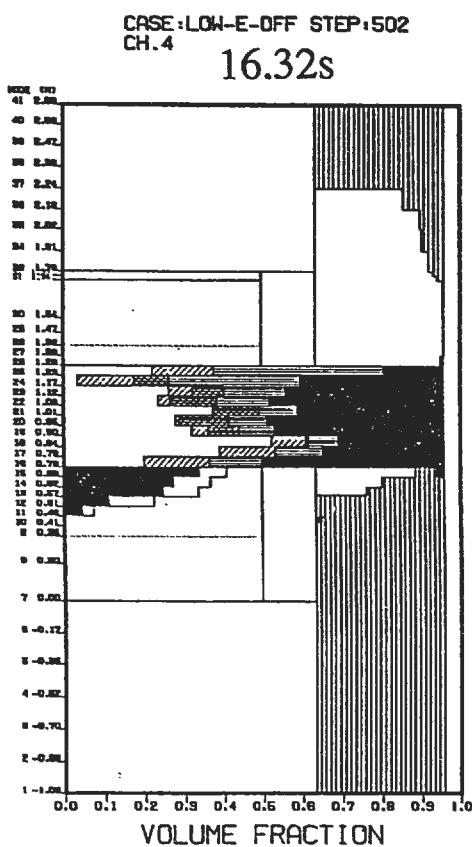


FUEL MOTION (F) = -0.8492  
 VOID (V) = 3.0803  
 DOPPLER (D) = -1.2659  
 FUEL DENSITY (O) = -0.2365  
 STEEL MOTION (S) = 0.1983



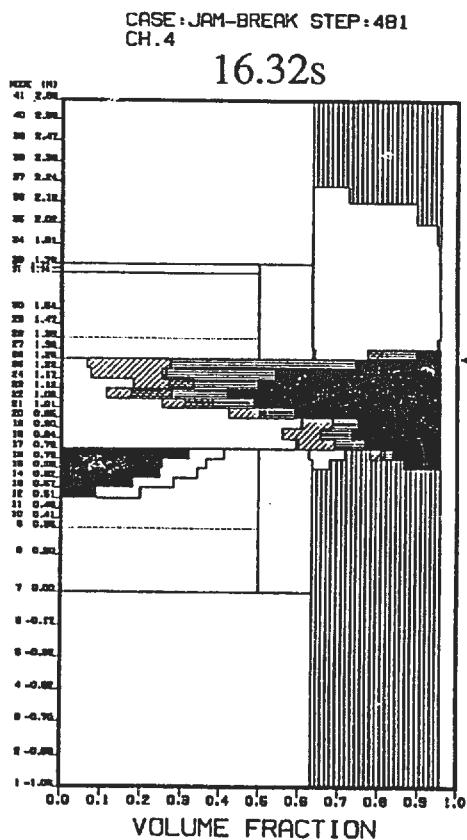
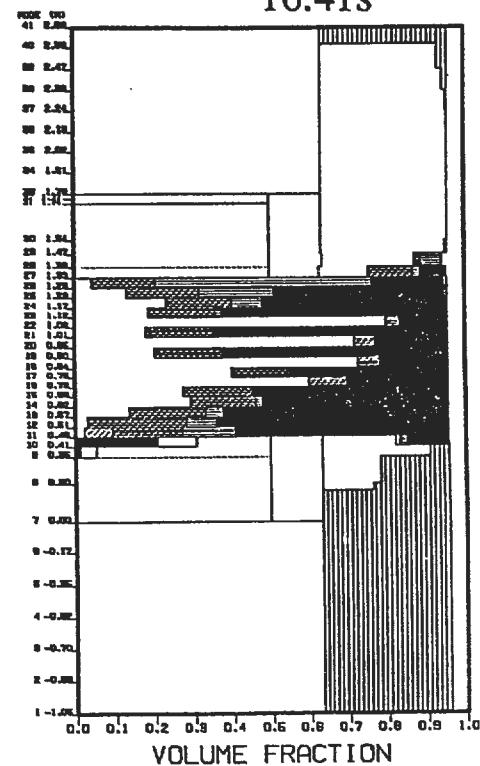
SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

ch.4



LOW-E-OFF

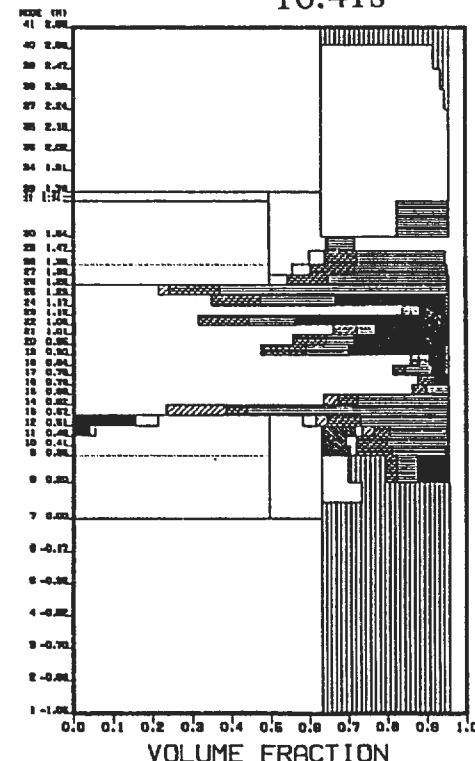
no break

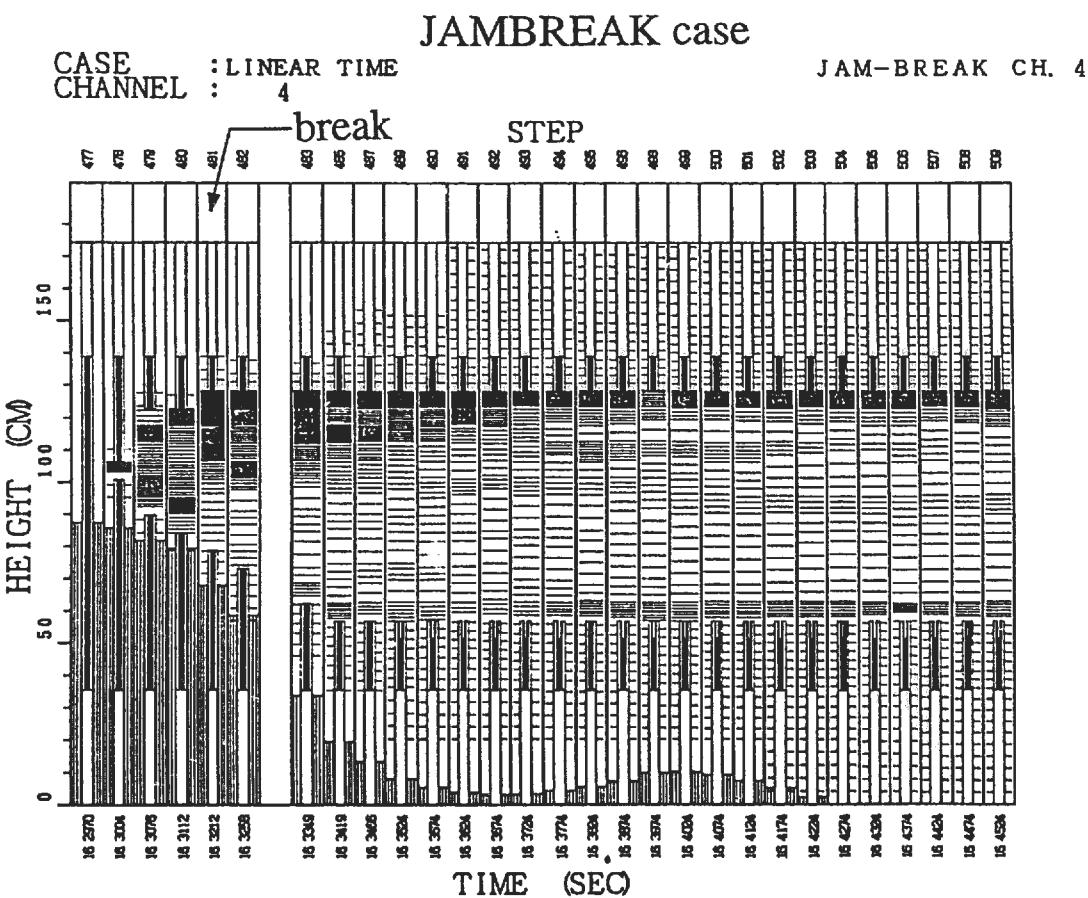
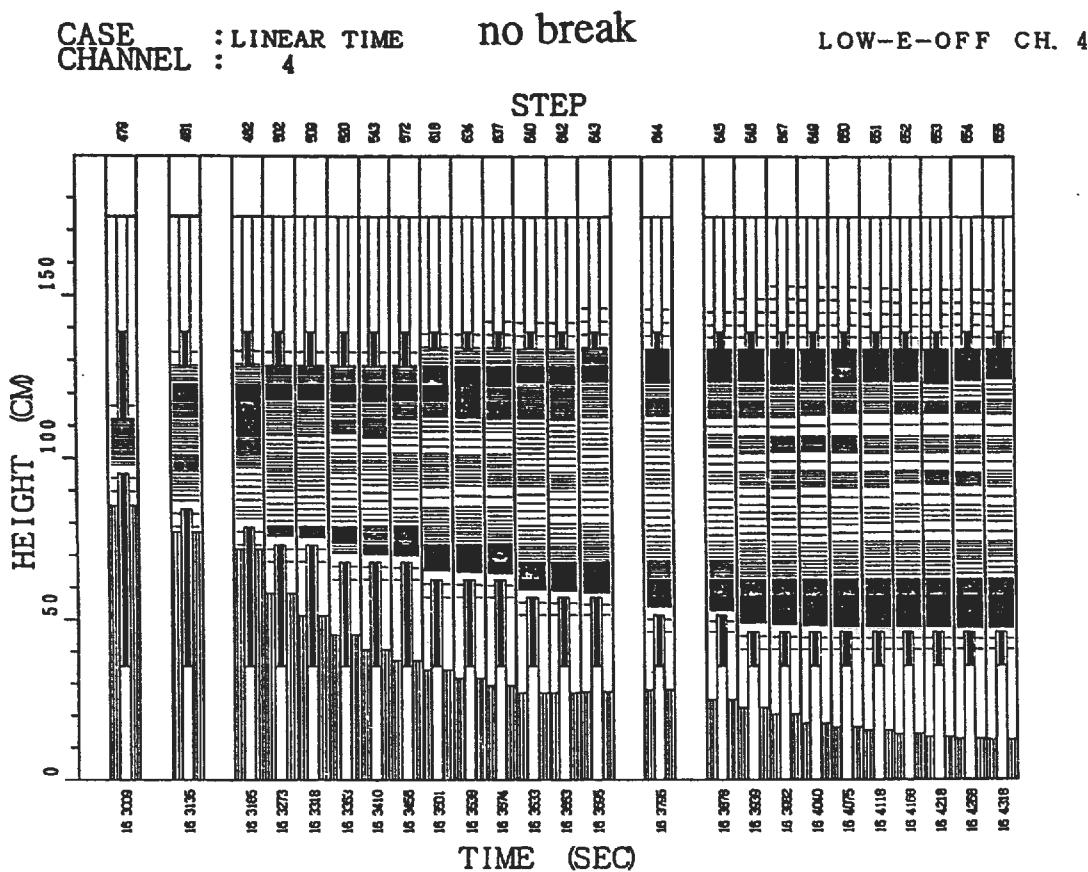
CASE : LOW-E-OFF STEP : 650  
CH.4

JAMBREAK

← break of  
jammingCASE : JAM-BREAK STEP : 500  
CH.4

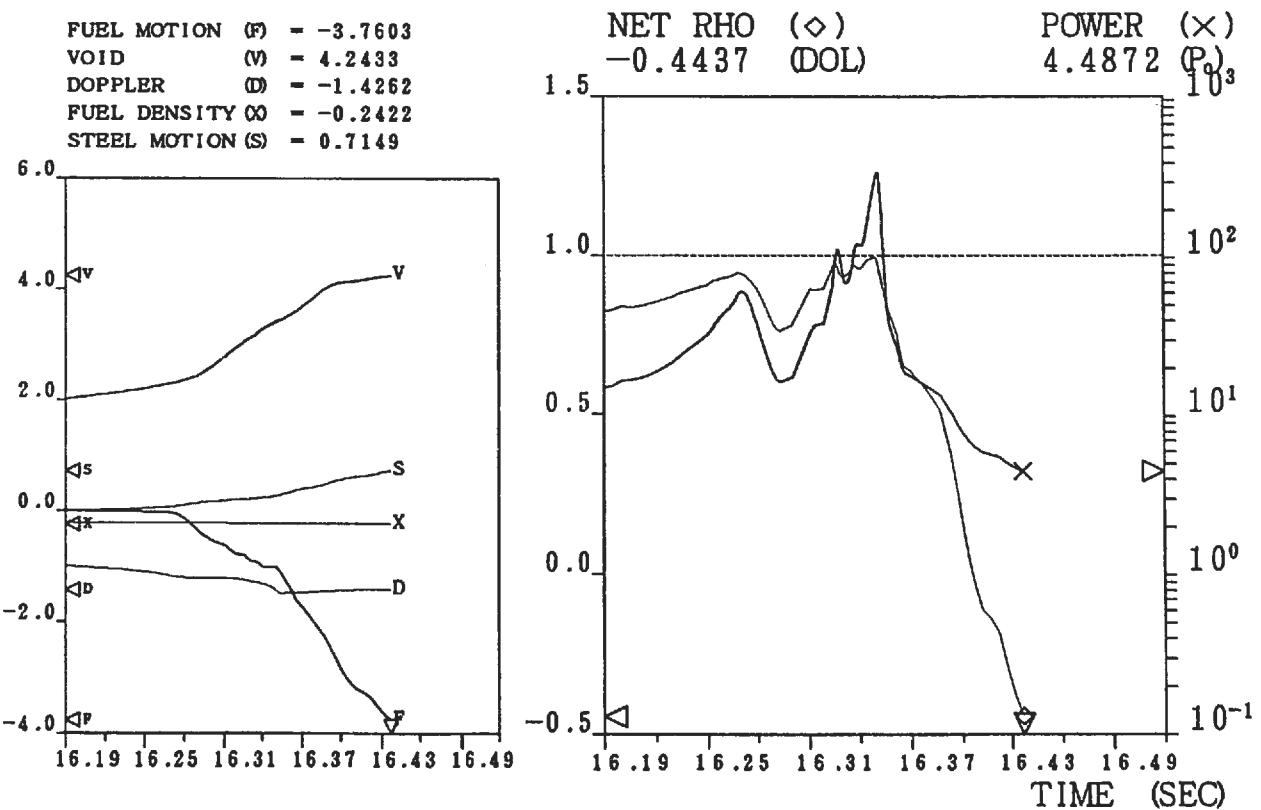
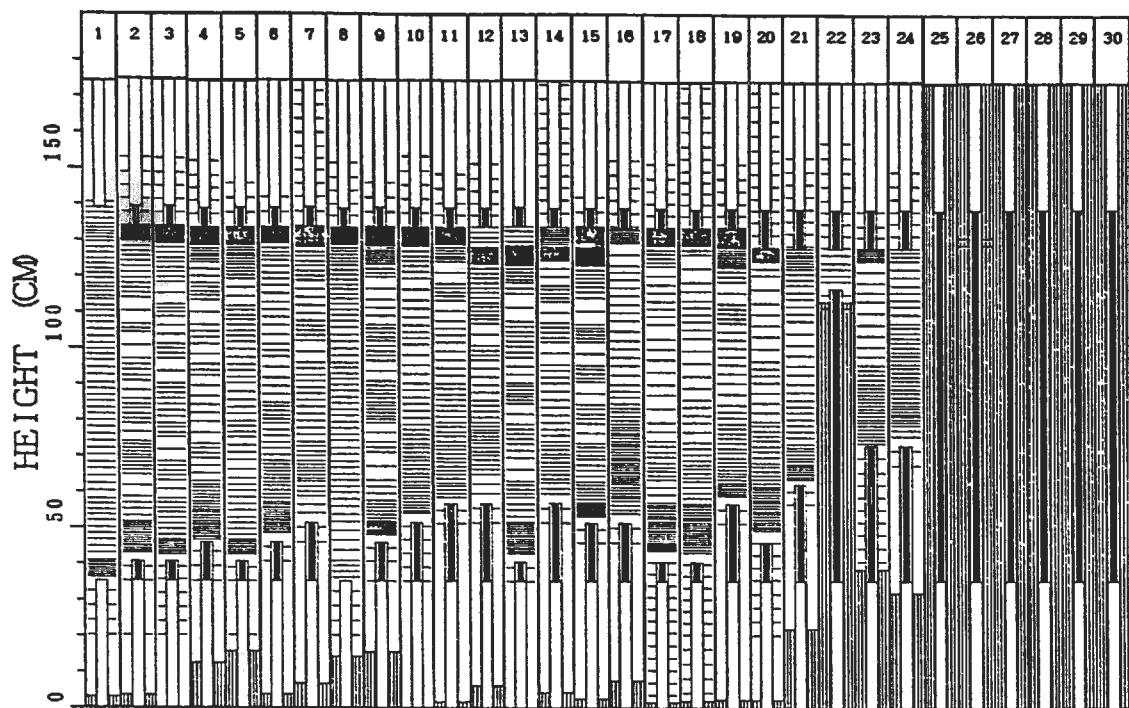
16.41s





STEP = 656 final step  
 TIME = 16.4368 (SEC)  
 NUMBER BY CHANNEL

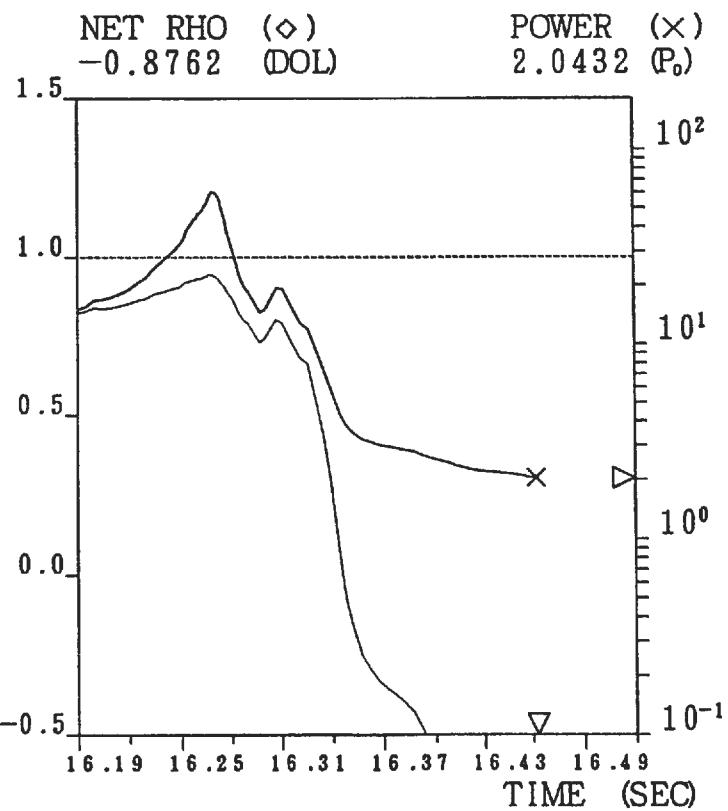
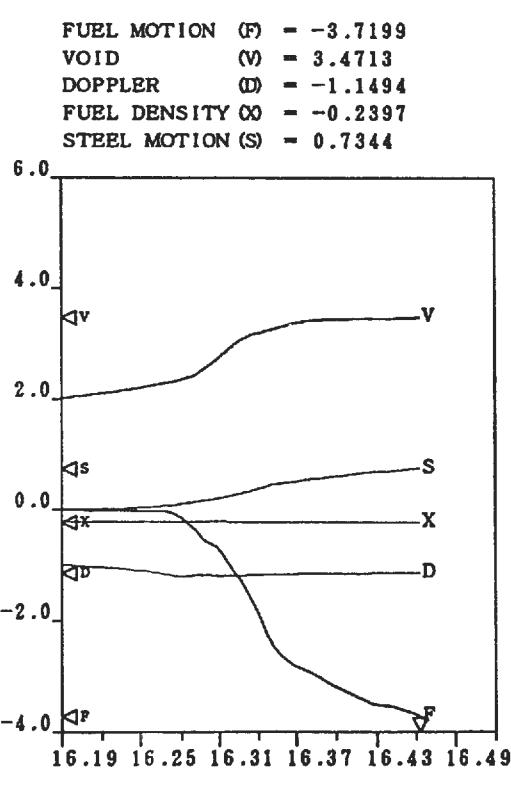
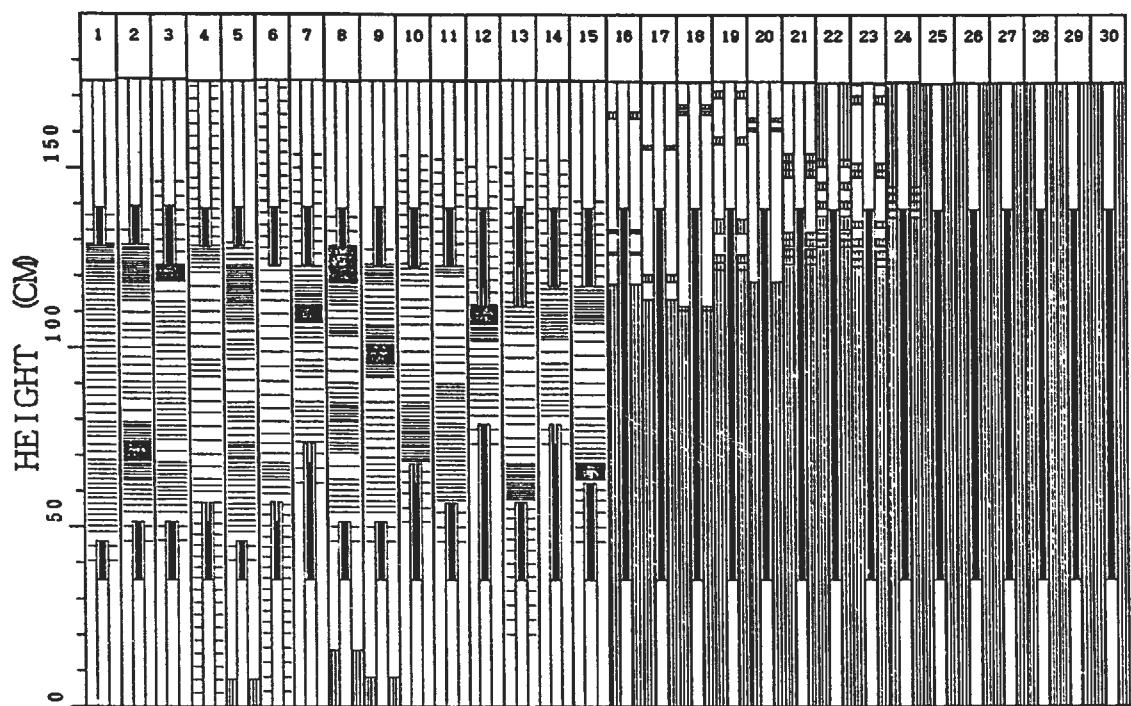
LOW-E-OFF



SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

STEP = 511 final step  
 TIME = 16.4624 (SEC) JAMBREAK case  
 NUMBER BY CHANNEL

JAM-BREAK



SAS-CHANNEL STATUS / NET REACTIVITY VS. TIME

### 3. Concluding Remarks

In a reactor case, channel area is smaller than in CABRI geometry, and chunk temperature is lower than in CABRI case. Therefore, chunk flow and its jamming behavior should be treated more carefully in a reactor case.

If a severer jamming is postulated, void reactivity insertion leads to increase net reactivity up to  $\sim 1\$$ . However, higher power introduces higher Doppler reactivity insertion rate (negative), thus total energy release could be limited.

Doppler reactivity

$$\rho_{\text{Dop}} = \frac{\alpha_{\text{Dop}}}{\beta_{\text{eff}}} \cdot \ln\left(\frac{T_f}{T_f^0}\right)$$

insertion rate

$$\dot{\rho}_{\text{Dop}} = \frac{\alpha_{\text{Dop}}}{\beta_{\text{eff}}} \cdot \frac{\dot{T}_f}{T_f}$$

Fuel temp. increase rate

$$\dot{T}_f = \frac{\text{Power}[P_0] \cdot \text{Normalpower}[J/s]}{\text{Mass}[kg] \cdot C_F[J/kg/T]} [K/s]$$

$\therefore$  Doppler insertion rate is roughly estimated,  $\dot{\rho}_{\text{Dop}} \approx 0.1 \times \text{Power}[\$/s]$

$\therefore$  if  $P = 100P_0$ ,  $\dot{\rho}_{\text{Dop}} \approx -10 \$/s (\pm 50 \%)$