

ナトリウム冷却MOX燃料大型炉心の再臨界回避方策の評価

(研究報告)

2000年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

ナトリウム冷却 MOX 燃料大型炉心の再臨界回避方策の評価

藤田朋子*

要旨

実用化戦略調査研究の一環として、有力な候補プラントの1つであるナトリウム冷却 MOX 燃料大型炉心について、再臨界回避方策の評価を実施した。

実証炉の炉心崩壊事故解析等による従来知見から、流量低下型事象時に炉停止に失敗し、大規模な溶融燃料プールが形成されて初めて、径方向揺動等による燃料の移動集中が生じ、厳しい即発臨界現象に至る可能性があることが分かっている。

再臨界の可能性を排除するために、炉心物質の再配置を制御する CMR(Controlled Material Relocation)概念に基づいた再臨界回避方策の候補として、内部ダクト付き集合体、LAB（下部軸ブランケット）一部削除型集合体が提案されている。これらの方策について SIMMER-IIIコードを用いた予備解析を実施し、CMR 有効性の比較検討を行った。

検討した候補のうち、内部ダクト付き集合体が最も燃料流出が早く、再臨界回避方策として有力である見通しを得た。LAB 一部削除集合体でも、若干燃料流出は遅くなるが有望な候補である。しかしながら、中央ピンに UAB（上部軸ブランケット）を残す場合は、炉心下方での FCI によって炉心燃料領域内に燃料が再流入するため、炉心性能へ著しい影響を与えない限り、中央ピンの UAB も削除する方が良い。中央ピンの燃料軸長の長短が燃料流出挙動に与える影響は小さく、むしろ UAB 有無の影響が重要である。

*大洗工学センターシステム技術開発室リスク評価技術開発グループ

An Evaluation Study of Measures for prevention of Re-criticality
in Sodium-cooled Large FBR with MOX fuel

Tomoko Fujita*

Abstract

As an effort in the feasibility study on commercialized Fast Breeder Reactor cycle systems, an evaluation of the measures to prevent the energetic re-criticality in sodium-cooled large MOX core, which is one of the candidates for the commercialized reactor, has been performed. The core disruptive accident analysis of Demonstration FBR showed that the fuel compaction of the molten fuel by radial motion in a large molten core pool had a potential to drive the severe super-prompt re-criticality phenomena in ULOF sequence.

In order to prevent occurrence of the energetic re-criticality, a subassembly with an inner duct and the removal of a part of LAB are suggested based on CMR (Controlled Material Relocation) concept. The objective of this study is the comparison of the effectiveness of CMR among these measures by the analysis using SIMMER-III.

The molten fuel in the subassembly with inner duct flows out faster than that from other measures. The subassembly with inner duct will work effectively in preventing energetic re-criticality. Though the molten fuel in the subassembly without a part of LAB flows out a little slower, it is still one of the promising measures. However, the UAB should be also removed from the same pin to prevent the fuel re-entries into the core region due to the pressurization by FCI below the core, unless it disturbs the core performance.

The effect of the axial fuel length of the center pin to CMR behavior is small, compared to the effect of the existence of UAB.

* OEC, System Engineering Tech. Div., Nuclear System Safety Research Group.

目次

1. はじめに	1
2. 評価方針	2
3. 解析条件	3
4. CMRの有効性に関する必要条件の検討	5
4.1 内部ダクト付き集合体	5
(1) 内部ダクトの冷却材入口を低圧プレナムに設置する場合 (低圧プレナムケース)	5
(2) 内部ダクトの冷却材入口を高圧プレナムに設置する場合 (高圧プレナムケース)	6
(3) 低圧プレナムケースと高圧プレナムケースの比較	8
4.2 LAB 一部削除型集合体 (燃料短尺)	9
(1) UAB 有りの場合	9
(2) UAB 無しの場合	10
(3) UAB 有無の比較	11
4.3 LAB 一部削除型集合体 (LAB のみ削除)	12
(1) UAB 有りの場合	12
(2) UAB 無しの場合	12
(3) UAB 有無の比較	13
5. CMRの有効性の比較	15
6. 結論	17
7. 今後の予定	17
8. 謝辞	18
9. 参考文献	18

図表リスト

表 3.1 解析条件（設計データ）

表 4 解析結果一覧

- 図 2.1 内部ダクト付き集合体概念図
- 図 2.2 LAB 一部削除型集合体（燃料短尺）概念図
- 図 2.3 LAB 一部削除型集合体（LAB のみ削除）概念図
- 図 3.1 内部ダクト付き集合体（低圧プレナムケース）解析体系図
- 図 3.2 内部ダクト付き集合体（高圧プレナムケース）解析体系図
- 図 3.3 LAB 一部削除型集合体（燃料短尺/UAB あり）解析体系図
- 図 3.4 LAB 一部削除型集合体（燃料短尺/UAB なし）解析体系図
- 図 3.5 LAB 一部削除型集合体（LAB のみ削除/UAB あり）解析体系図
- 図 3.6 LAB 一部削除型集合体（LAB のみ削除/UAB なし）解析体系図
- 図 3.7 出力履歴
- 図 4.1.(1)-1 各成分体積率（低圧プレナムケース）
- 図 4.1.(1)-2 各領域の燃料質量推移（低圧プレナムケース）
- 図 4.1.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量（低圧プレナムケース）
- 図 4.1.(1)-4 炉心燃料領域の圧力履歴（低圧プレナムケース）
- 図 4.1.(2)-1 各成分体積率（高圧プレナムケース）
- 図 4.1.(2)-2 各領域の燃料質量推移（高圧プレナムケース）
- 図 4.1.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量（高圧プレナムケース）
- 図 4.1.(2)-4 炉心燃料領域の圧力履歴（高圧プレナムケース）
- 図 4.1.(3)-1 燃料流出挙動の比較
- 図 4.2.(1)-1 各成分体積率（燃料短尺/UAB 有り）
- 図 4.2.(1)-2 各領域の燃料質量推移（燃料短尺/UAB 有り）
- 図 4.2.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量（燃料短尺/UAB 有り）
- 図 4.2.(1)-4 炉心燃料領域の圧力履歴（燃料短尺/UAB 有り）
- 図 4.2.(2)-1 各成分体積率（燃料短尺/UAB 無し）
- 図 4.2.(2)-2 各領域の燃料質量推移（燃料短尺/UAB 無し）
- 図 4.2.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量（燃料短尺/UAB 無し）
- 図 4.2.(2)-4 炉心燃料領域の圧力履歴（燃料短尺/UAB 無し）
- 図 4.2.(2)-5 UAB 有無の比較
- 図 4.3.(1)-1 各成分体積率（LAB のみ削除/UAB 有り）
- 図 4.3.(1)-2 各領域の燃料質量推移（LAB のみ削除/UAB 有り）
- 図 4.3.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量（LAB のみ削除/UAB 有り）
- 図 4.3.(1)-4 炉心燃料領域の圧力履歴（LAB のみ削除/UAB 有り）

- 図 4.3.(2)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 無し)
- 図 4.3.(2)-2 各領域の燃料質量推移 (LAB のみ削除/UAB 無し)
- 図 4.3.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (LAB のみ削除/UAB 無し)
- 図 4.3.(2)-4 炉心燃料領域の圧力履歴 (LAB のみ削除/UAB 無し)
- 図 4.3.(2)-5 UAB 有無の比較
- 図 5.1 再臨界回避方策の候補の燃料流出挙動の比較
- 図 5.2 内部ダクト破損機構と破損タイミング (FAIDUS 炉心との比較)

1. はじめに

実用化戦略調査研究¹⁾の一環として、有力な候補プラントの1つであるナトリウム冷却 MOX 燃料大型炉心について、炉心損傷事故評価を実施した。

同炉心では、異常な過渡時のスクラム失敗事象(ATWS: Anticipated Transient Without Scram)の発生頻度は、炉停止系を2系統独立させて設置するなどの設計対応により、ほぼ無視出来る程度にまで低減されている。しかしながら、高速炉が一般に炉心が最大臨界体系になく、仮想的に、大規模な溶融燃料移動があった場合には、炉心体系の実効増倍率が増加し、再臨界に至る可能性があることから、炉心損傷の事象推移を適切に評価し、再臨界の可能性を排除する方策を講ずることが求められている²⁾。

実証炉の遷移過程評価等による従来の知見から、炉停止に失敗して ULOF 事象(Unprotected Loss Of Flow: 流量低下型事象)が発生し、大規模な溶融燃料プールが形成されてはじめて、径方向揺動(スロッシング)等によって燃料が移動、集中し、そのため正の反応度印加が誘発されて厳しい即発臨界に至る可能性があることが分かっている。

このような ULOF 事象遷移過程における再臨界の可能性を排除するために、CMR(Controlled Material Relocation: 炉心物質の制御された再配置)概念が有効であることが議論されている³⁾。CMR とは、炉心損傷時の燃料の運動を再臨界が抑制される方向に制御しようとする概念である。具体的には、燃料破損集合体内の溶融燃料が、同集合体と隣接集合体のラップ管壁を破損して、燃料プールが隣接集合体へ拡大する前に、各集合体毎に燃料を速やかに軸方向炉心領域外へ流出させる等の概念が提案されている。

各集合体毎に溶融燃料を炉心燃料領域から排出すれば、炉心領域内の中性子数は減少して炉心内の反応度は低下するため、さらなる燃料破損を抑制し、核的終息に至ることができる。

この概念に基づき、FAIDUS 炉心^{4~5)}に代表されるように、内部ダクト付き集合体を装荷した再臨界回避炉心が提案されている。また、これらの再臨界回避方策における CMR を検証する目的で、日本原子力発電株式会社との共同研究により、カザフスタン共和国の IGR 炉で EAGLE 計画が実施されている。

本研究の目的は、内部ダクト付き集合体の他に、再臨界回避方策の候補として提案されている、LAB 一部削除型集合体(燃料短尺(下もしくは上下軸ブランケット削除)、LABのみ削除)を対象として、SIMMER-IIIにて燃料流出挙動を評価し、CMRの有効性を比較、検討するとともに、設計に対する必要条件を明らかにするところにある。

2. 評価方針

(1) 評価対象炉心

本解析で対象とする炉心は、炉心軸長 120cm、上下軸ブランケット長 31/40cm の初装荷炉心であり、そのうちから、中程度の P/F 値の集合体一体を代表集合体とした。

炉心損傷を生じる原因は、ATWS のうち、発生頻度が最も高く、炉心損傷に至るまでの時間的余裕が比較的短い ULOF 事象とする。

(2) 再臨界回避方策

本解析で対象とする再臨界回避方策の候補を図 2.1～2.3 に示す。

・ 内部ダクト付き集合体 (図 2.1)

中央ピン 37 本分のピン占有面積及び流路断面積を内部ダクトで置き換え、ラップ管壁よりも内部ダクト壁を薄くすることで、燃料破損時に内部ダクトから優先的に熔融燃料を流出させることを目的とする。

・ LAB 一部削除型集合体 (燃料短尺) (図 2.2)

中央ピン 37 本の燃料軸長を、他の 234 本よりも燃料下端から 30cm 程度短尺化し、かつ下部軸ブランケット燃料を削除する。上部軸ブランケット燃料については、設置/削除の両方について検討する。

・ LAB 一部削除型集合体 (LAB のみ削除) (図 2.3)

中央ピン 37 本の下部軸ブランケット燃料を削除する。上部軸ブランケット燃料については、設置/削除の両方について検討する。

(3) 評価の着目点

有意な正の反応度印加によって再臨界に至らないようにするためには、大規模な熔融燃料プールを形成する以前に、集合体形状を確保したまま十分な燃料量を炉心領域外へ排出することが必要となる。従来²⁾⁶⁾の知見から、定格状態の 30~40% 以上の燃料量が炉心燃料領域外へ流出すると核的終息に至ることが分かっている²⁾⁶⁾。従って、前述の再臨界回避の達成は、40%の燃料量が流出するまでの時間と、ラップ管壁が破損するまでの時間の競合で左右されることから、40%の燃料流出時間に着目した評価を行う。

具体的には、以下を評価目標とする。

- ・それぞれの再臨界回避方策について、40%の燃料流出を達成するために必要なラップ管壁肉厚等の設計要求条件を明らかにする。
- ・それぞれの再臨界回避方策について、事象推移の特徴を把握し、燃料の排出過程において問題となる現象を明らかにする。
- ・設計要求条件、問題点を明らかにした上で、再臨界回避方策として、最も有望である候補を選出する。

3. 解析条件

(1) 解析体系

内部ダクト付き集合体、LAB 一部削除型集合体（燃料短尺、LAB のみ削除）のそれぞれ集合体 1 体を解析体系とする。図 3.1～3.6 に解析体系を示す。

内部ダクト付き集合体の場合、流動計算の不安定性を回避するために、内部ダクト及びその内部は 1 メッシュとしている。また、LAB 一部削除型集合体（燃料短尺、LAB のみ削除）についても中央ピン、通常ピンを分けて、それぞれ 1 メッシュの粗い体系としている。計算機資源節約のため、内部ダクト付き集合体は径方向 7 メッシュ、LAB 一部削除型集合体は径方向 2 メッシュの粗い $r-z$ 2 次元体系で模擬している。各セル毎に燃料、ナトリウム等は瞬時混合となるため、粗いメッシュ体系の場合、一般に FCI 圧力に対して過大評価となる。

(2) 解析コード

2次元多相多流体解析コード SIMMER-III の熱流体力学計算部を使用する。

(3) 初期条件

・幾何学形状データ

燃料ピン及びラッパ管の構造物の幾何学形状の設計データを表 3.1 に示す。通常ピンは、燃料軸長は 120cm、上下軸ブランケット長 31/40cm とする。

燃料短尺ピン、LAB 削除ピンについては、それぞれ燃料軸長は 90cm、120cm であり、両者とも下部軸ブランケットは削除する。上部軸ブランケットについては、有る場合、無い場合の両方を検討する。また、燃料及び軸ブランケットを支持するために 2 cm のインシュレータペレットを考慮する。

内部ダクト付き集合体の内部ダクト外対面間距離は 64.6mm、肉厚は 1.5mm である。

再臨界回避方策案によって、炉心燃料領域に残留する破損燃料が流出する効果を、より明らかにすることを目的として、炉心燃料領域に破損燃料が残留するように、炉燃グループ提示の 120cm 炉心設計データのうち、解析では、上下軸ブランケット長をそれぞれ 31cm、40cm に変更して使用している。また、ラッパ管壁肉厚の必要条件を求めるために、初期のラッパ管肉厚は十分に厚い 10mm とした。

・燃料内の F P ガスについて

燃料は、初装荷初期燃料を模擬し、燃料粒内及び粒界の F P ガスを考慮していない。定格状態から蓄積された燃料粒内及び粒界ガスは、破損時及び破損後の燃料分散の駆動源の 1 つとなり得るため、これを無視することは、燃料流出所要時間を保守的に評価することとなる。

(4) 過渡条件

・フローコストダウンカーブ及び出力テーブル

流量半減時間 10 秒の ULOF 事象を想定する。同時に、流量低下に伴う出力上昇として、SAS4A 解析結果のサンプル出力履歴(図 3.7 参照。最大出力約 168Po,

投入エネルギー約 19FPS) をテーブル入力を与える。

・燃料粒子粘性

燃料粒子粘性とは、燃料粒子がピン東部へ侵入し、流出する際に見かけ上の粘性を高めることによって、構造材への熱損失による熔融燃料の流動低下を模擬するパラメータ(CPVISI)であり、実証炉における遷移過程評価の基準ケースでは、物性論で導出された半経験式から CPVISI=5 を使用している。本検討では、実証炉での設定値よりも若干、燃料流出に対して保守側である CPVISI=50 の値を使用した。SIMMER-III では、粒子粘性は粒子径に依存して変えることができるが、本検討では、粒子粘性の粒子径依存性は考慮しないこととする。

・インシュレーターペレットの模擬について

インシュレーターペレットは、燃料短尺ピン及び LAB 削除ピンの燃料及び軸ブランケットを支持する構造物であり、解析上、被覆管の一部として模擬している。インシュレーターペレットを支持する上下のピン形状が破損した場合には、インシュレーターペレットを強制的に破損させてスチール粒子にし、可動な状態とする。インシュレーターペレットを強制的に破損させない場合、熔融するまで同じ位置に留まって燃料流出を妨げるため、現実的でない判断した。

・ガスプレナム内への流体の侵入

燃料短尺ピン、LAB 削除ピンの場合には、燃料の下端及び UAB 無しの場合には上端にガスプレナムが存在し、燃料破損後に高い圧力が発生すると、ガスプレナムの内部に流体が侵入する可能性がある。しかしながら、本検討の中では、ガスプレナム内の圧力を適正に評価していないことから、ガスプレナム内部への流体の侵入を無視することとした。

・その他

30 秒間の定常計算後に過渡計算を行っているため、本文及び解析結果の図表の時刻は、LOF 及び TOP 開始時刻に 30 秒加算された時刻である。

4. CMR の有効性に関する必要条件の検討

本章では、各々の再臨界回避方策案において、特に燃料破損後の燃料流出挙動に着目して事象推移を評価し、CMR の有効性についての必要条件を明確にすることを目的とする。

4.1 内部ダクト付き集合体

内部ダクト付き集合体は、中央ピン 37 本分のピン占有面積及び流路断面積を内部ダクトで置き換え、燃料破損時に内部ダクトから優先的に熔融燃料を流出させることを目的としている。

現在までの解析結果から、内部ダクトの下端を高圧プレナムに設置すると、燃料流出の過程において、内部ダクト壁の破損後に、内部ダクト内に残存する未沸騰の液相ナトリウムとピンバンドル部の熔融燃料の接触によって有意な FCI 圧力が発生し、ラッパ管形状を損なう可能性があることが分かっている。有意な FCI 圧力を抑制するためには、内部ダクト内の冷却材を速やかにボイド化させる必要がある。

本検討では、内部ダクト内冷却材の速やかなボイド化をさせるために内部ダクトの下端を低圧プレナムに設置する場合と、内部ダクトの下端を高圧プレナムに設置し、かつ高圧プレナムを介して他の集合体への冷却材排出を考慮する場合について検討を行った。

両者の解析結果から、有意な FCI 圧力の発生の有無及び炉心燃料が 40% 排出するまでの所要時間を比較し、どちらが再臨界回避方策として有望であるかを明確にする。

(1) 内部ダクトの冷却材入口を低圧プレナムに設置する場合（低圧プレナムケース）

本ケースでは、内部ダクト壁が破損する際の速やかなボイド化を狙いとし、内部ダクトの冷却材入口を、ピンバンドル部の冷却材入口プレナム（高圧プレナム）とは切り離して、低圧プレナムに設置した場合を想定する。

解析結果を表 4 にまとめて示す。図 4.1.(1)-1 に各成分体積率、図 4.1.(1)-2 に各領域の燃料質量の推移を示す。図 4.1.(1)-3 は、破損燃料の密度分布と運動量を示した図である。バンドル部の炉心燃料領域の圧力履歴を図 4.1.(1)-4 に示す。

約 51.69 秒後に、上部ブランケット位置(J30)にて沸騰を開始する。被覆管は、約 58.8 秒にバンドル部炉心燃料上部(j25)で熔融を開始し、ナトリウム蒸気によって上方へ移動する。

燃料破損は約 59.43 秒にバンドル中央のピンから発生し、ナトリウム蒸気圧によって、未だ健全形状を保っているピン部と破損領域との境界（以下、ピン束境界と呼ぶ）上部に吹き寄せられる（図中①）。当該時刻での UAB,LAB を除く燃料平均温度は約 2758K、内部ダクト内冷却材の最高温度は約 1212K、内部ダクト壁の最高温度は約 1241K である。

内部ダクト壁は、燃料破損から 0.18 秒経過後に破損する。内部ダクト壁の破損直前の圧力は、ナトリウム蒸気によって約 29bar まで上昇しており、この時の UAB, LAB を除く燃料平均温度は、約 3108K 程度である。内部ダクト内冷却材は、未沸騰状態である。

内部ダクト壁が 59.61 秒に破損すると、内部ダクト内冷却材と熔融燃料の接触により、約 117 気圧もの FCI 圧力が発生するが、半値幅は約 50 ミリ秒程度の短時間であるため、ラッパ管の形状を損なうことはないと考えられる。破損燃料は主に UAB 下側及びラッパ管壁側に吹き寄せられ（図中②）、徐々に UAB を溶かしつつ上方へ流出するとともに、ラッパ管壁を侵食する。

内部ダクトからの燃料流出により、内部ダクトの冷却材液面は徐々に下方へ押し下げられ、上方の冷却材もボイド化する。LAB 上部で閉塞している燃料はナトリウム蒸気圧によって押し出され、内部ダクト中に排出される（図中③）。

60.2~60.8 秒付近では、破損領域の圧力が低下し、高圧プレナムと低圧プレナムの圧力差を駆動力に、下方のピン束間に侵入した燃料が炉心燃料領域に押し戻されており、炉心燃料領域の燃料質量は一旦増加している（図中④）。

約 60.91 秒（燃料破損から約 1.48 秒後）に、炉心領域の燃料質量は初期の 40% 流出を達成している。燃料は、炉心領域の上方に約 9%、下方に約 31% 流出している（図中⑤）。

・ラッパ管肉厚への設計要求条件

炉心燃料質量の 40% が流出した時点において、残存するラッパ管の最小厚さは約 8.1mm（炉心燃料領域の軸方向中心やや上方）であり、最大約 2mm 熔融したことが確認された。ラッパ管壁破損時に残存しているラッパ管壁の温度上昇分の熱容量が全てラッパ管壁の熔融に使用されると考えると、熔融量は最大で更に 1.5mm 増加すると考えられる。ラッパ管壁は、燃料破損後約 1.48 秒で約 3.5mm 熔融することから、1 秒あたり約 2.5mm 熔融すると言える。

FCI 圧力等による機械的破損を無視し、熱的な熔融侵食による破損のみを考慮した場合、内部ダクトを通して 40% の燃料流出するまでラッパ管形状を確保するには、ラッパ管肉厚は 3.5mm 程度あればよい。但し、FCI 圧力による変形破損等については、別途検討する必要がある。

(2) 内部ダクトの冷却材入口を高圧プレナムに設置する場合（高圧プレナムケース）

内部ダクト壁破損後に、ラッパ管形状を損なうことなく、速やかに内部ダクトから破損燃料を流出させるためには、内部ダクト内の冷却材が速やかにボイド化されることが必要であり、そのためには、内部ダクトの冷却材入口プレナムを低圧プレナムに設置することが有効であることを前節で示した。一方、通常バンドル部の冷却材入口は高圧プレナムに設置する必要があるため、内部ダクトを高圧プレナムに設置する場合は、内部ダクト肉厚をより薄くできるなどの利点がある。

ULOF 遷移過程に至るような比較的緩慢な事象推移の場合には、全炉心の集

合体での燃料破損及び沸騰の非同時性が大きい。内部ダクト壁破損後に、沸騰あるいは破損燃料との接触によって、内部ダクトから高圧プレナムへ排出された冷却材が、未沸騰集合体等の他の集合体へ回り込む効果によって、着目する集合体の内部ダクト内のボイド化を促進できる可能性がある。従って、本ケースでは、他の集合体 1 体分への冷却材の回り込みを考慮し、流量調整のために、内部ダクトのオリフィスを出口側へ変更して、解析を実施した。

解析結果を表 4 にまとめて示す。図 4.1.(2)-1 に各成分体積率、図 4.1.(2)-2 に各領域の燃料質量の推移を示す。図 4.1.(2)-3 は、破損燃料の密度分布と運動量を示した図である。バンドル部の炉心燃料領域の圧力履歴を図 4.1.(2)-4 に示す。

燃料破損は約 59.43 秒にバンドル中央のピンから発生し、ナトリウム蒸気圧によって上部のピン東境界へ吹き寄せられる(図中①)。当該時刻での UAB,LAB を除く燃料平均温度は、約 2757K、内部ダクト内冷却材の最高温度は約 1170K、内部ダクト壁の最高温度は約 1277K である。

内部ダクト壁は、燃料破損から約 0.17 秒経過後に破損する。内部ダクト壁の破損直前の圧力は、ナトリウム蒸気によって約 11bar まで上昇しており、この時の UAB,LAB を除く燃料平均温度は、約 3094K 程度である。内部ダクト内の冷却材は、未沸騰状態である。

内部ダクト壁が 59.60 秒に破損すると、内部ダクト内の冷却材と FCI を起こして最大約 44 気圧の圧力が発生する。破損燃料は主にピン東境界及びラッパ管壁側に吹き寄せられ、徐々に UAB を溶かしつつ上方へ流出するとともに、ラッパ管壁を侵食する(図中②)。

内部ダクトからの燃料流出により、内部ダクトの冷却材液面は徐々に下方へ押し下げられるが、内部ダクトの上方はオリフィスによって冷却材の流出が抑制されているため、冷却材はナトリウムプレナム部に留まっている。LAB 上部で閉塞している燃料はナトリウム蒸気圧によって押し出され、内部ダクト中に排出される(図中③)。

60.3 秒(燃料破損から約 0.87 秒後)に、炉心領域の燃料質量は初期の 40%流出を達成し、破損燃料は、ほぼ全量が下方に流出している。

・ラッパ管肉厚への設計要求条件

炉心燃料質量の 40%が流出した時点において、残存するラッパ管の最小厚さは約 7.8mm(炉心燃料領域の軸方向中心やや上方)であり、最大約 2.2mm 溶融したことが確認された。ラッパ管壁破損時に残存しているラッパ管壁の温度上昇分の熱容量が全てラッパ管壁の溶融に使用されると考えると、溶融量は最大で更に 0.8mm 増加すると考えられる。

FCI 圧力等による機械的破損を無視し、熱的な溶融侵食による破損のみを考慮した場合、内部ダクトを通して 40%の燃料流出するまでラッパ管形状を確保するには、ラッパ管肉厚は 3mm 程度あればよい。但し、FCI 圧力による変形破

損等については、別途検討する必要がある。

(3) 低圧プレナムケースと高圧プレナムケースの比較

低圧プレナムケースと高圧プレナムケースの炉心燃料領域の燃料量を比較して図 4.1.(3)-1 に示す。両者ともに、内部ダクト壁は、燃料破損後約 0.2 秒で破損しており、この時の内部ダクト内の冷却材は、いずれも未沸騰状態である。

低圧プレナムケースでは、内部ダクト壁破損時に発生する FCI 圧力に駆動されて、早期の燃料流出は高圧プレナムケースよりも早い。しかしながら、破損領域の圧力がある程度低下すると、下方のピン束間に侵入した破損燃料が、通常ピン冷却材入口圧力（高圧プレナムの圧力）と内部ダクトの冷却材入口圧力（低圧プレナムの圧力）の圧力差によってが炉心燃料領域に押し戻され、炉心燃料領域の燃料質量は一旦 10%程度増加している。このため、低圧プレナムケースでは、40%流出を達成するのに高圧プレナムケースよりも時間を要している。

低圧プレナムケースでは、燃料破損から約 1.48 秒で炉心から 40%の燃料が流出する。40%燃料流出までのラップ管形状を確保するためには、ラップ管肉厚は 3.5mm 程度あればよい。この場合、破損燃料は炉心燃料領域の上下にそれぞれ 1 : 3 の割合で分散する。一方、高圧プレナムケースでは、燃料破損から約 0.87 秒で炉心から 40%の燃料が流出する。40%燃料流出までのラップ管形状を確保するためには、ラップ管肉厚は 3 mm 程度あればよい。この場合、破損燃料は、ほぼ全量が下方へ流出する。

内部ダクトの下端を、高圧プレナムに設置する場合と低圧プレナムに設置する場合を比較すると、以下の理由から、高圧プレナムへの設置が望ましい。

- ・内部ダクトの下端を高圧プレナムに設置した場合、内部ダクト壁破損後に、沸騰あるいは破損燃料との接触によって、内部ダクトから高圧プレナムへ排出された冷却材が、未沸騰集合体等の他の集合体へ排出され、着目する集合体の内部ダクト内のボイド化を促進できる効果があるため、ラップ管形状を損なうような有意な FCI 圧力を生じない可能性がある。（但し、これを確認するために、全炉心解析による評価が必要となる。）
- ・内部ダクトの下端を高圧プレナムに設置した場合、内部ダクト内とピンバンドル部との圧力差が小さいため、内部ダクト壁の肉厚を薄く出来るので、早期の CMR が可能である。
- ・内部ダクトの下端を低圧プレナムに設置した場合、破損領域の圧力低下後にピン束部入口圧力（高圧プレナムに直結）と内部ダクト入口（低圧プレナムに直結）の圧力差によって、下方のピン束部に侵入した破損燃料が、炉心燃料領域内に吹き戻される現象が生じ、速やかな燃料排出の観点から、好ましくない。

4.2 LAB 一部削除型集合体(燃料短尺)

LAB 一部削除型集合体(燃料短尺)は、燃料軸長が通常ピンよりも燃料下端側で 30cm 短く、かつ下部軸ブランケットが削除された、37 本分の中央ピンを内蔵する。これは、下方への燃料流出に際し、出力分担率が低い燃料下部と下部軸ブランケット位置で、破損燃料が長時間の閉塞を形成することなく、速やかに集合体中央から燃料流出させることを目的としている。一般に、中央ピンを燃料短尺とする場合の核的性能は、内部ダクト付き集合体の場合と比較して、短尺でも 37 本ピン分の燃料量が多く内蔵されているため、内部ダクト付き集合体の場合よりも優れている。

(1) UAB ありの場合

解析結果をまとめて表 4 に示す。図 4.2.(1)-1 に各成分体積率、図 4.2.(1)-2 に各領域の燃料質量の推移を示す。図 4.2.(1)-3 は、破損燃料の密度分布と運動量を示した図である。炉心燃料領域の圧力履歴を図 4.2.(1)-4 に示す。

燃料破損は、約 59.44 秒で発生する。当該時刻での UAB,LAB を除く燃料平均温度は、約 2812K である。破損後の燃料は軸方向上下に分散する(図中①)。

59.60 秒では、破損領域下部の FCI 圧力の発生により、燃料は一旦破損領域中心に集まるが(図中②)、再度破損領域の上下に分散/閉塞し、徐々に下方の被覆管を溶かして流出する。

燃料破損後約 0.6 秒間は、炉心燃料領域の燃料質量にほとんど変化がないが、破損燃料が LAB 下端あるいは UAB 上端まで移動するための所要時間である。

燃料分散の駆動力源は、FCI によって生じるナトリウム蒸気圧とスチール蒸気圧である。

また、燃料流出量を決定する主要な現象は、ピン束間への燃料あるいは高温スチールの流出によって、ピン形状を破損させ、流路を拡大することである。従って、LAB 一部削除型集合体の場合には、ピンの破損領域の拡大が重要である。

下部ガスプレナム被覆管を溶かしながら燃料は下方へ流出し、約 61.03 秒(燃料破損後 1.59 秒)には炉心燃料質量が 40%減少に至る(図中③)。当該時刻での中央バンドル部、通常バンドル部炉心領域に残存する燃料はそれぞれ 6%、51%であり、流出する燃料のほとんど全量が、炉心燃料領域の下方へ流出する。

しかしながら、下方で発生した FCI により、破損燃料は再び上方へ吹き上げられて、炉心燃料質量は一旦初期の約 70%まで増大し(図中④)、約 62.46 秒に再び 40%減少に至る(図中⑤)。

LAB 一部削除型集合体では、内部ダクトのように大きな燃料排出経路がないため、破損燃料はピン束間へ侵入してピン形状を溶融破損しながら流路を拡大して流出する。この流出過程において、破損燃料は未だピン形状を保っている下部ガスプレナム被覆管の上部で閉塞を起こす。破損燃料は、閉塞している間に温度上昇し、ピン束間を通過して、徐々に下方へ流出した際に、冷却材と接触して FCI

を起こす。一般に、接触する破損燃料温度が高いほど、FCI 圧力は大きくなる。炉心燃料領域から初期燃料量の 40%が流出する時点では、内部ダクト付き集合体（高圧プレナムケース）の場合は、内部ダクトから約 20%の破損燃料が流出し、下部ガスプレナム領域には約 20%の燃料が残存する。同領域の燃料平均温度は約 1509K である。一方、LAB 一部削除型集合体（燃料短尺/UAB 有りの場合）では、約 37%の燃料が同領域に残存し、燃料平均温度は約 1984K である。内部ダクト付き集合体に比して、LAB 一部削除型集合体は、明確な流出経路が無いために、高温の破損燃料を下部ガスプレナム領域に多く保持しており、そのため、高温となった破損燃料の流出過程において下部での FCI を発生しやすい条件にあると言える。

下部プレナムでの FCI による燃料の再流入は速やかな燃料排出を阻むものであり、今後、下部プレナムの体積の現実的な模擬も視野に入れて検討する必要があるが、解析体系に依存する FCI 発生の不確かさなどを未検討であることから、本検討では、一義的に最初に 40%流出する時刻を核的終息の判断材料とした。

(2) UAB 無しの場合

解析結果をまとめて表 4 に示す。図 4.2.(2)-1 に各成分体積率、図 4.2.(2)-2 に各領域の燃料質量の推移を示す。図 4.2.(2)-3 は、破損燃料の密度分布と運動量を示した図である。炉心燃料領域の圧力履歴を図 4.2.(2)-4 に示す。また、UAB 有りと UAB 無しの場合の炉心燃料領域の燃料量を比較して図 4.2.(2)-5 に示す。

燃料破損は、約 59.44 秒で発生する。当該時刻での UAB,LAB を除く燃料平均温度は、約 2811K である。UAB 有りの場合と同様に、破損直後の破損燃料は、炉心燃料領域の上下に分散する（図中①）。59.96 秒に中央ピンの下方ピン束境界付近で FCI が発生するが、上部では燃料粒子の閉塞が生じているために、上方への燃料流出はほとんどはない（図中②）。

UAB 無しの場合は、燃料破損後約 1.1 秒間は、UAB 有りの場合と同様に下方のピン束間を通して燃料流出している。UAB 無しの場合は、FCI によって破損燃料の一部が吹き上げられているため、燃料破損後約 1.1~1.3 秒付近では、UAB 有りよりもやや流出が遅くなっている。61.09 秒（破損後 1.65 秒）には中央ピンの上部ガスプレナムが完全に熔融して、上方への燃料流出が開始し（図中③）、61.41 秒（燃料破損後 1.97 秒、図中④）に炉心燃料質量は初期の 40%減少に至る。

炉心燃料領域から 40%減少するまでの所要時間は、燃料破損から約 1.97 秒である。当該時刻での中央ピン束部、通常ピン束部の炉心領域に残存する燃料はそれぞれ 8%、52%程度である。流出する燃料は、炉心燃料領域を挟んでほぼ均等に上下に分散している。

燃料短尺ピン（UAB 無し）の場合、ラッパ管は少なくとも燃料破損から約 1.97 秒間は健全形状を確保できる程度の強度（肉厚）が必要である。4.1.(1)節の内

部ダクトの場合と同様のラッパ管侵食速度を仮定し、かつ熱的な溶融侵食による破損のみを考慮する場合、ラッパ管は約5 mm あればよい。

(3) UAB 有無の比較

LAB 一部削除型集合体（燃料短尺）の場合では、炉心燃料の40%減少までの燃料破損時からの所要時間は、UAB 有りの場合には燃料破損から約1.59秒、UAB 無しの場合には約1.97秒である。但し、UAB 有りの場合は、約1.59秒で40%の燃料が流出するが、FCI 発生によって一度流出された燃料が再び炉心燃料領域に流入する。

40%流出時の燃料分布を比較すると、UAB ありの場合は、流出する燃料のほぼ全量が下方へ移動しているのに対し、UAB 無しの場合には、炉心領域を挟んでほぼ均等に上下に分散している。

UAB 有りの場合では、UAB の熱容量によって、炉心燃料上部のピン形状が長時間確保されるため、上方への流出経路が拡大しないことが、流出する燃料のほぼ全量が下方へ移動する原因である。流出燃料の冷却性の観点からは、破損燃料は上下プレナムに分散されることが望ましい。

LAB 一部削除型集合体では、内部ダクトのように大きな燃料排出経路がないため、破損燃料はピン束間へ侵入してピン形状を溶融破損しながら流路を拡大して流出する。この流出過程において、破損燃料は未だピン形状を保っている下部ガスプレナム被覆管の上部で閉塞を起こす。破損燃料は、閉塞している間にも温度上昇し、ピン束間を通過して徐々に下方へ流出した際に、冷却材と接触して FCI を起こす。一般に、接触する破損燃料温度が高いほど、FCI 圧力は大きくなる。40%燃料流出の時点では、UAB 有りの場合には、下部ガスプレナム領域に残留する燃料質量割合は約37%であり、燃料平均温度は約1984Kである。一方、UAB 無しの場合には、同領域の燃料質量割合は約5%であり、燃料平均温度は約1738Kである。このことから、UAB 有りの方が、下部プレナムでの FCI 発生によって、破損燃料が炉心燃料領域内に再流入する可能性が大きい。

従って、燃料短尺を採用する場合は、流出燃料の冷却性を確保すること、FCI による炉心燃料領域への燃料再流入を回避することを考慮する必要がある、UAB 無しの採用が望ましい。

4.3 LAB 一部削除型集合体(LAB のみ削除)

中央 37 本ピンの燃料軸長は、通常ピンと同等であるが、下部軸ブラケットが削除されている。一般に、LAB のみ削除した場合の核的性能は、燃料短尺の場合よりも、中央 37 本ピンの 30cm 分の燃料量が多いため、優れたものになる。

(1) UAB 有りの場合

解析結果をまとめて表 4 に示す。図 4.3.(1)-1 に各成分体積率、図 4.3.(1)-2 に各領域の燃料質量の推移を示す。図 4.3.(1)-3 は、破損燃料の密度分布と運動量を示した図である。炉心燃料領域の圧力履歴を図 4.3.(1)-4 に示す。

燃料破損は、約 59.42 秒に発生する。当該時刻での UAB,LAB を除く燃料平均温度は、約 2783K である。破損燃料は、上下に分散し、ピン束との境界で閉塞を形成する(図中①)。60.25 秒に下部インシュレーターペレットが破損し、さらに下方への被覆管侵食を進む(図中②)。燃料破損後約 0.8 秒間の炉心燃料領域の燃料質量は、ほとんど変化がないが、破損燃料が LAB 下端まで移動するための所要時間である。

破損領域内の燃料は、上下に分散したまま下方への侵食を続け、60.82 秒後に、LAB が破損する(図中③)。LAB 破損により、下方への燃料排出は促進され、61.14 秒(燃料破損後 1.72 秒)に炉心燃料質量は初期の 40%減少に至る(図中④)。

しかしながら、流出した燃料が下方で FCI を起こし、破損燃料は再び上方へ吹き上げられる。炉心燃料質量は一旦初期の約 90%まで増大し、約 63.06 秒(燃料破損後 3.64 秒)に再び 40%減少に至る(図中⑤)。炉心燃料領域から初期燃料量の 40%が流出する時点では、内部ダクト付き集合体(高圧プレナムケース)の場合は、内部ダクトから約 20%の破損燃料が流出し、下部ガスプレナム領域には約 20%の燃料が残存する。同領域の燃料平均温度は約 1509K である。一方、LAB 一部削除型集合体(LAB のみ削除/UAB 有りの場合)では、初期燃料量の約 32%が下部ガスプレナム領域に残存しており、燃料平均温度は約 2215K である。内部ダクト付き集合体に比して、LAB 一部削除型集合体は、明確な流出経路が無いために、高温の破損燃料を下部ガスプレナム領域に多く保持しており、そのため、高温となった破損燃料の流出過程において下部での FCI を発生しやすい条件にあると言える。下部プレナムでの FCI による燃料の再流入は速やかな燃料排出を阻むものであり、今後、下部プレナムの体積の現実的な模擬も視野に入れて検討する必要があるが、解析体系に依存する FCI 発生の不確かさなどを未検討であることから、4.2(1)節と同様に、本検討では、一義的に最初に 40%流出するタイミングを核的終息の判断材料とした。

(2) UAB 無しの場合

解析結果をまとめて表 4 に示す。図 4.3.(2)-1 に各成分体積率、図 4.3.(2)-2

に各領域の燃料質量の推移を示す。図 4.3.(2)-3 は、破損燃料の密度分布と運動量を示した図である。炉心燃料領域の圧力履歴を図 4.3.(2)-4 に示す。また、UAB 有り と UAB 無し の場合の炉心燃料領域の燃料量を比較して図 4.3.(2)-5 に示す。

燃料破損は、59.42 秒に発生する。当該時刻での UAB,LAB を除く燃料平均温度は、約 2786K である。破損燃料は、上下に分散し、ピン束との境界で閉塞を形成する（図中①）。60.09 秒に下部インシュレーターペレットが破損し、さらに下方への被覆管侵食も進む（図中②）。上部インシュレーターペレットは、60.14 秒に破損し、上方への被覆管侵食も進む（図中③）。60.42 秒には上部ガスプレナム被覆管が完全に溶融し、上方への燃料流出が顕著となる（図中④）。

破損領域内の燃料は、上下に分散したまま下方への侵食を続け、60.67 秒後に、LAB が破損する（図中⑤）。LAB 破損により、下方への燃料排出は促進され、60.78 秒（燃料破損後 1.36 秒）に炉心燃料質量は初期の 40%減少に至る（図中⑥）。

炉心燃料領域から 40%減少するまでの所要時間は、燃料破損から約 1.36 秒である。当該時刻での燃料分布は、炉心燃料領域を挟んで、上下ほぼ均等に分散している。当該時刻での中央ピン束部、通常ピン束部の炉心領域に残存する燃料はそれぞれ 9%、51%程度である。

本ケースでは、燃料短尺の場合よりも内蔵する燃料量が多いために、高温の液体スチールがより多く存在し、この液体スチールからの熱伝達によって上部ガスプレナム被覆管が早く完全溶融している。上部ガスプレナム被覆管の破損により、上方への流路が拡大されるため、燃料短尺の場合よりも、炉心燃料領域の燃料量の減少が早い。

LAB のみ削除ピン（UAB 無し）の場合、ラッパ管は少なくとも燃料破損から約 1.36 秒間は健全形状を確保できる程度の強度（肉厚）が必要である。4.1.(1) 節の内部ダクトの場合と同様のラッパ管侵食速度を仮定し、かつ熱的な溶融侵食による破損のみを考慮する場合、ラッパ管は約 3.5mm 必要である。

(3) UAB 有無の比較

LAB のみ削除ピンの場合、炉心燃料の 40%減少までの燃料破損時からの所要時間は、UAB 有りの場合には燃料破損から約 1.72 秒、UAB 無しの場合には約 1.36 秒である。但し、UAB 有りの場合、燃料短尺ピンの場合と同様に、一旦 60%まで流出した後、下方での FCI 発生によって再び約 90%まで炉心燃料領域の燃料質量は増大する。炉心燃料 40%流出時における燃料分布は、UAB ありの場合、ほぼ全量が下方へ移動するのに対し、UAB 無しの場合では、破損燃料は、炉心燃料領域を挟んで上下均等に分散している。初期燃料量の 40%燃料流出の時点では、UAB 有りの場合には、下部ガスプレナム領域に残留する燃料質量割合は約 32%であり、燃料平均温度は約 2215K である。一方、UAB 無しの場合には、同領域の燃料質量割合は約 20%であり、燃料平均温度は約 1589K である。

UAB 有りの場合の方が、高温の破損燃料が多く下部ガスプレナム領域に存在するため、下部プレナムでの FCI 発生によって、破損燃料が炉心燃料領域内に再流入する可能性が大きい。UAB 有りの場合は、UAB 無しに比して全ての燃料が下方へ流出するために、下方での FCI が発生しやすい条件と言える。

従って、LAB のみ削除ピンを採用する場合は、流出燃料の冷却性を確保すること、FCI による炉心燃料領域への燃料再流入を回避することを考慮する必要がある、燃料短尺型の場合と同様に、UAB 無しの採用が望ましい。

5. CMR の有効性の比較

内部ダクト付き集合体及び LAB 一部削除型集合体における、炉心燃料領域からの燃料流出挙動の解析結果を比較した図を、図 5.1 に示す。

検討した全ての方策の中で、内部ダクト付き集合体の高圧プレナムケースの場合が最も燃料流出が早く、燃料破損から約 0.87 秒で初期燃料量の 40%が流出する。低圧プレナムケースでも、若干高圧プレナムケースに比べて遅くなるものの燃料破損から約 1.48 秒で 40%流出する。内部ダクト付き集合体の 2 ケースは共にラッパ管肉厚は 3~4 mm 程度あればよく（但し熱的溶融侵食のみ考慮する場合である）、再臨界回避方策として有効である。高圧プレナムケースは、破損燃料のほぼ全量が下方へ流出するのに対し、低圧プレナムケースでは、1 割が上方へ流出しており、PAHR の観点からは、炉心の上下に分散する低圧プレナムケースの方が若干優れていると言える。

しかしながら、内部ダクトの冷却材入口の設置プレナムについて、高圧プレナムの場合と低圧プレナムの場合を比較すると、以下の理由から、高圧プレナムへの設置が望ましい。

- ・内部ダクト壁破損後に、沸騰あるいは破損燃料との接触によって、内部ダクトから高圧プレナムへ排出された冷却材が、未沸騰集合体等の他の集合体へ排出され、着目する集合体の内部ダクト内のボイド化を促進できる効果があるため、ラッパ管形状を損なうような有意な FCI 圧力を生じない可能性がある。（但し、これを確認するために、全炉心解析による評価が必要となる。）
- ・内部ダクト内とピンバンドル部との圧力差が小さいため、内部ダクト壁の肉厚を薄く出来る。
- ・内部ダクトの冷却材入口を低圧プレナムに設置した場合、破損領域の圧力低下後にピン束部入口圧力（高圧プレナムに直結）と内部ダクト入口（低圧プレナムに直結）の圧力差によって、下方のピン束部に侵入した破損燃料が、炉心燃料領域内に吹き戻される現象が生じ、速やかな燃料排出の観点から、好ましくない。

また、LAB 一部削除集合体の場合でも、初期燃料量の 40%が流出するまでの燃料破損からの所要時間は、約 1.36~2.0 秒であり、ラッパ管肉厚に焼き直すと、3.5~5 mm 程度であることから、内部ダクト付き集合体の場合よりも若干燃料流出は遅くなるが、有望な候補の一つとなることが明らかとなった。

しかしながら、LAB 一部削除型集合体の UAB 有りの場合では、炉心燃料領域内に燃料が再流入する現象が生じている。LAB 一部削除型集合体では、内部ダクトのように大きな燃料排出経路がないため、破損燃料はピン束間へ侵入してピン形状を溶融破損しながら流路を拡大して流出する。この流出過程において、破損燃料は未だピン形状を保っている下部ガスプレナム被覆管の上部で閉塞を起こす。破損燃料は、閉塞している間にも温度上昇し、ピン束間を通過して、徐々に下方へ流出した際に、冷却材と接触して FCI を起こす。一般に、接触する破損燃料温度が高いほど、FCI 圧力は大きくなる。内部ダクト付き集合体に比して、LAB 一部削除型集合体では、内部ダクト付き集合体に比して、高温の破損燃料が下部ガスプレナム領域に残留しやすく、

そのため、流出過程において下部プレナムでの FCI を発生しやすい条件にあると言える。この現象は、流出する燃料の全量が下方へ流出する UAB 有りの場合の方が、閉塞が生じやすいため、顕著である。

また、PAHR の観点からも、破損燃料が、上下プレナムに均等に分散配置する UAB 無しの場合の方が、全量が下方へ流出する UAB 有りの場合よりも優れていると言える。

燃料短尺、LAB のみ削除における燃料流出挙動は、大きな差異はなく、むしろ UAB 有無の影響の方が、燃料流出挙動にとって重要であることが明らかとなった。

検討結果から総合的に判断して、再臨界回避方策として最も有望であるのは、内部ダクト付き集合体（内部ダクト下端を高圧プレナムに設置する場合）である。以下に他の方策と比較した場合の利点を示す。

- ・明確な燃料排出経路によって早期の燃料排出が実現可能
- ・内部ダクト下端を高圧プレナムに設置する場合、内部ダクト壁の肉厚を小さく抑えられる。
- ・燃料流出が早いいため、ラッパ管壁の肉厚を小さく抑えられる。
- ・破損燃料は、内部ダクトから優先的に排出されるため、排出過程において内部ダクト流路、ピン束部などで閉塞が生じにくく、下部プレナムでの FCI 発生に駆動される炉心領域への燃料再流入が発生しにくい。

参考までに、内部ダクト壁の破損機構と破損タイミングについて、今回報告した 120cm 炉心内部ダクト付き集合体（高圧プレナムケース及び低圧プレナムケース）と FAIDUS 炉心集合体と比較した結果を図 5.2 に示す。120cm 炉心内部ダクト付き集合体は、両ケースともに「クラスト形成型溶融貫通（高熱流速型）」の内部ダクト壁破損モードであり、比エンタルピーが高くかつ内部ダクト壁破損時間が短いケースでは、内部ダクト内が未沸騰状態のまま、内部ダクト壁が破損する FAIDUS 炉心集合体での結果と同様の傾向である。

6. 結論

ナトリウム冷却 MOX 燃料大型炉心における再臨界回避方策の燃料流出挙動を評価し、CMR の有効性を比較、検討するとともに、設計に関する必要条件を明らかにすることを目的として、検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

予備的評価であるが、検討結果から総合的に判断して、再臨界回避方策として最も有力であるのは、内部ダクト付き集合体（内部ダクト下端を高圧プレナムに設置する場合）である。他の方策と比較した場合の利点は、以下である。

- ・明確な燃料排出経路によって早期の燃料排出が実現可能
- ・内部ダクト下端を高圧プレナムに設置する場合、内部ダクト壁の肉厚を小さく抑えられる。
- ・燃料流出が早いため、ラッパ管壁の肉厚を小さく抑えられる。（熱的溶融侵食のみを考慮する場合、3mm あればよい。）
- ・破損燃料は、内部ダクトから優先的に排出されるため、排出過程においてピン束部などで閉塞が生じにくく、燃料破損後数秒間の範囲においては、下部プレナムでの FCI 発生に駆動される炉心領域への燃料再流入が発生しにくい。

内部ダクト付き集合体の低圧プレナムケースでも、若干高圧プレナムケースに比べて遅くなるが、再臨界回避方策として有効である。ラッパ管肉厚は、熱的溶融侵食のみ考慮する場合、4mm 程度あればよい。

また、LAB 一部削除集合体の場合でも、内部ダクト付き集合体の場合よりも若干燃料流出は遅くなるが、有望な候補となる見通しを得た。ラッパ管肉厚は、熱的溶融侵食のみ考慮する場合、3.5～5mm 程度あればよい。しかしながら、UAB 付きの LAB 一部削除集合体の場合は、下部プレナムで発生する FCI によって、炉心燃料領域内に燃料が再流入する現象が生じており、LAB 一部削除型集合体では、同時に UAB も削除することが望ましい。また、内部ダクト付き集合体と UAB 付きの LAB 一部削除型集合体では、炉心燃料のほとんどが下部プレナムへ流出するのに対し、UAB なしの LAB 一部削除型集合体では、上下プレナムへほぼ均等に流出しており、後続の PAHR 過程での炉容器内冷却成立の観点からも、UAB 削除は重要である。

燃料短尺型、LAB のみ削除型のように、中央ピンの燃料軸長の長短が燃料流出挙動に与える影響は小さく、むしろ UAB 有無の影響が重要であることが明らかとなった。

なお、本研究は予備的評価であり、特に本結論で得られた数値の信頼性については、解析コードの検証度に依存するため、今後モデルの検討も含めた詳細検討及び評価が必要である。

7. 今後の予定

今回の評価は短期間で結果を得るために、簡易な体系で解析を実施しているため、最終的な結論を得るには、詳細な体系での解析を実施するとともに、十分な検討が進んでいない以下の項目の評価検討が必要である。

- ・現象の不確かさ（粒子粘性、FP ガスの影響、FCI の不確かさ）
- ・全炉心体系での、再臨界回避方策の有効性検討
- ・下部プレナムでの FCI 発生に起因する炉心燃料領域への燃料再流入の詳細検討

8. 謝辞

本研究の実施にあたり、詳細にわたり技術のご指導、ご助言を賜りましたリスク評価技術開発グループの飛田 吉春副主研、丹羽 元グループリーダー、ならびに遠藤寛氏に深く感謝の意を表します。解析業務の助成、報告書の作成等に多大に貢献下さった丸紅ソフトウェア(株) 佐藤 友紀氏に厚くお礼申し上げます。

9. 参考文献

- 1) 早船浩樹、久保田健一他、「実用化戦略調査研究 (FBR プラント) -平成 10 年度予備調査結果要約の取りまとめ-」、JNC TN9420 99-004、1999 年 6 月
- 2) H.Niwa et al. "FUTURE NEEDS ON THE IN-PILE SAFETY EXPERIMENTS FOR THE COMMERCIALIZATION OF FBRS", Global Environment & Nuclear Energy Systems, 371 (1994)
- 3) H.Endo et al. "SAFETY FEATURES OF SELF-CONSISTENT NUCLEAR ENERGY", Global Environment & Nuclear Energy Systems,463 (1994)
- 4) 有江和夫他、"燃料損傷時の安全性向上を目指した大型 MOX 高速炉炉心概念の検討 (1)炉心概念"、日本原子力学会 1999 年秋の大会予稿集、G35(1999)
- 5) 遠藤寛他、"燃料傷時の安全性向上を目指した大型 MOX 高速炉炉心概念の検討 (2)炉心損傷時有効性評価"、日本原子力学会 1999 年秋の大会予稿集、G36(1999)
- 6) D.Struwe, et al. "Overview on Material Relocation Phenomena in Liquid Metal Fast Reactors as Consequence of Core Disruption" 1994, IWGFR/89

表 3.1 解析条件

ラッパ管外対面間距離*	206.4mm
肉厚*	10mm
内部ダクト外対面間距離	64.6mm
肉厚	1.5mm
集合体内ピン本数 内部ダクト付き	234 本
内部ダクトなし	271 本
炉心軸長	120cm
燃料ペレット外径	8.32mm
内径	2.62mm
被覆管外径	9.7mm
内径	8.5mm
上/下部軸ブランケット長*	31cm / 40cm
(インシュレーターペレット考慮の場合は、	29cm / 38cm)
上/下部インシュレーターペレット長	2cm / 2cm
上/下部ガスプレナム長*	0cm / 104.5cm
冷却材入口/出口温度	395℃ / 550℃

* 炉燃 Gr.提示の 120cm 炉心設計データは、下記のとおりである。再臨界排除方策案による燃料流出挙動への効果を明らかにするために、ラッパ管肉厚、軸ブランケット長等を解析では変更した。

ラッパ管外対面間距離	192.4mm
肉厚	3mm
上/下部軸ブランケット長	1.2cm / 10cm
上/下部ガスプレナム長	29.8cm / 127.5cm

表4 解析結果一覧

1. 内部ダクト付き集合体

解析ケース		内部ダクトの冷却材入口を低圧プレナム側へ (低圧プレナムケース)	内部ダクトの冷却材入口を高圧プレナム側へ ²⁾ (高圧プレナムケース)
定常 (30s)	集合体出力	8.787MW	8.787MW(回り込む集合体は発熱無しとする)
	流量	0.609kg/s,45.756kg/s	0.615kg/s,45.875kg/s
	最高燃料表面温度	1119 K	1119 K
過渡	最高燃料平均温度	1654 K	1654 K
	被覆管最高温度	886 K	886 K
	沸騰開始 ¹⁾	51.69 s	51.53 s
	被覆管移動	58.80 s	57.91 s
	燃料破損	59.43 s	59.43 s
	当該時刻の燃料平均温度 ³⁾	2758 K	2757 K
	当該時刻の内部ダクト内最高Na温度	1212 K	1170 K
	当該時刻の内部ダクト壁最高温度	1250 K	1274 K
	内部ダクト破損	59.61 s	59.60 s
	内部ダクト壁破損直前の圧力	2.90E+06 Pa	1.10E+06 Pa
	当該時刻の比内部エネルギー	1.25 MJ/kg	1.23 MJ/kg
当該時刻の燃料平均温度 ³⁾	3108 K	3094 K	
40%燃料排出時刻	60.91 s	60.30 s	
燃料破損~40%流出の所要時間	1.48 s	0.87 s	

- 1) 通常バンドル部のボイド率が10%以上となった時点を沸騰開始とした。
- 2) 他の集合体への冷却材の回り込みを考慮
- 3) UAB,LABを含まず

2. LAB一部削除型集合体 (燃料短尺)

解析ケース		UAB有りの場合	UAB無しの場合
定常 (30s)	集合体出力	9.755MW	9.755MW
	流量	49.567kg/s	49.528kg/s
	最高燃料表面温度	1094 K	1095 K
過渡	最高燃料平均温度	1598 K	1600 K
	被覆管最高温度	875 K	875 K
	沸騰開始 ¹⁾	53.83 s	53.78 s
	被覆管移動	58.46 s	58.47 s
	燃料破損	59.44 s	59.44 s
	当該時刻の燃料平均温度 ²⁾	2812 K	2811 K
	40%燃料排出時刻	61.03 s 燃料再流入あり	61.41 s
燃料破損~40%流出の所要時間	1.59 s	1.97 s	

- 1) 通常バンドル部のボイド率が10%以上となった時点を沸騰開始とした。
- 2) UAB,LABを含まず
- 3) ガスプレナムへの流体の侵入を無視する。
- 4) インシュレーターベレットを考慮する。

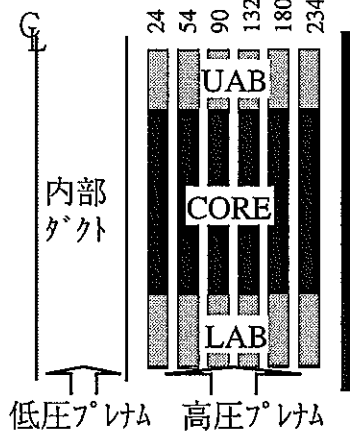
3. LAB一部削除型集合体 (LABのみ削除)

解析ケース		UAB有りの場合	UAB無しの場合
定常 (30s)	集合体出力	9.931MW	9.931MW
	流量	49.63kg/s	49.61kg/s
	最高燃料表面温度	1096 K	1097 K
過渡	最高燃料平均温度	1602 K	1604 K
	被覆管最高温度	875 K	876 K
	沸騰開始 ¹⁾	53.55 s	53.45 s
	被覆管移動	58.09 s	58.04 s
	燃料破損	59.42 s	59.42 s
	当該時刻の燃料平均温度 ²⁾	2783 K	2786 K
	40%燃料排出時刻	61.14 s 燃料再流入あり	60.78 s
燃料破損~40%流出の所要時間	1.72 s	1.36 s	

- 1) 通常バンドル部のボイド率が10%以上となった時点を沸騰開始とした。
- 2) UAB,LABを含まず
- 3) ガスプレナムへの流体の侵入を無視する。
- 4) インシュレーターベレットを考慮する。

低圧プレナムケース

内部ダクト冷却材入口：低圧プレナム
 内部ダクトオリフィス：なし



他集合体への冷却材回り込みを考慮

内部ダクト冷却材入口：高圧プレナム
 内部ダクトオリフィス：出口側

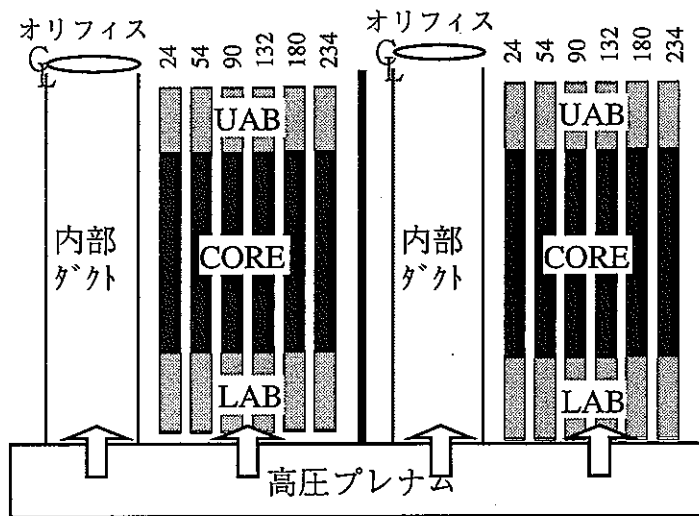
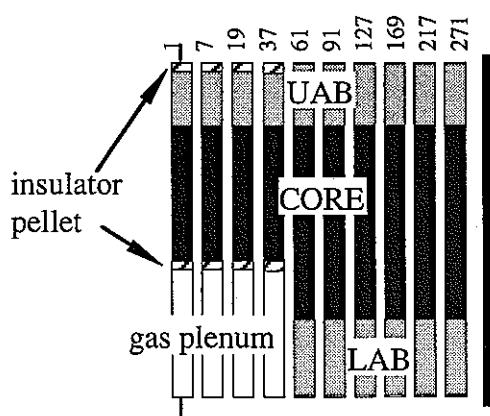


図2.1 内部ダクト付き集合体概念図

中央ピンのUAB有り

インシュレーターペレット考慮
 (ガスプレナムへの侵入を無視)



中央ピンのUAB無し

インシュレーターペレット考慮
 (ガスプレナムへの侵入を無視)

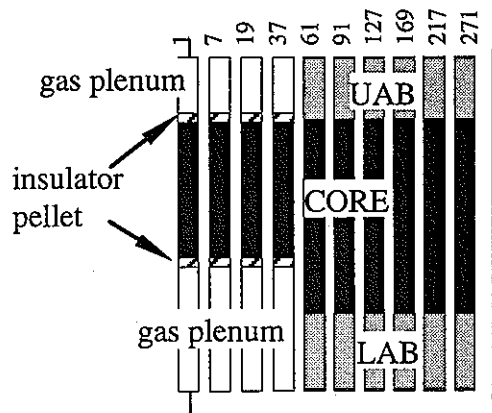
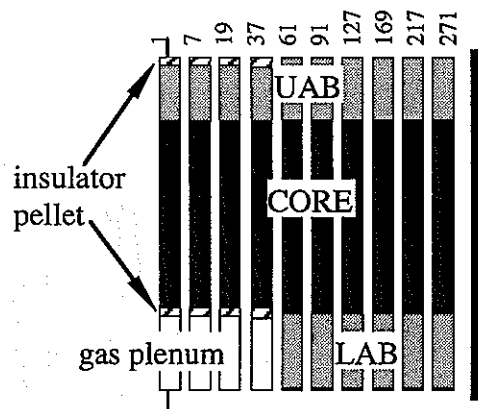


図2.2 LAB一部削除型集合体（燃料短尺）概念図

中央ピンのUAB有り

インシュレーターペレット考慮
(ガスプレナムへの侵入を無視)



中央ピンのUAB無し

インシュレーターペレット考慮
(ガスプレナムへの侵入を無視)

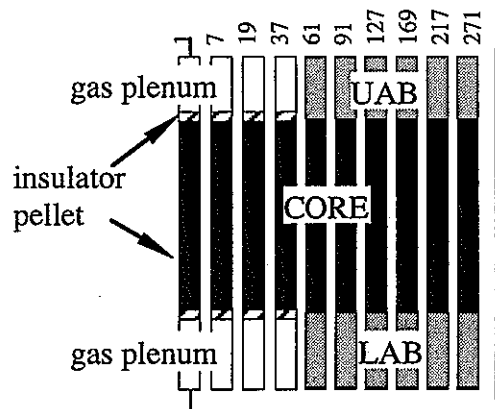


図2.3 LAB一部削除型集合体 (LABのみ削除) 概念図

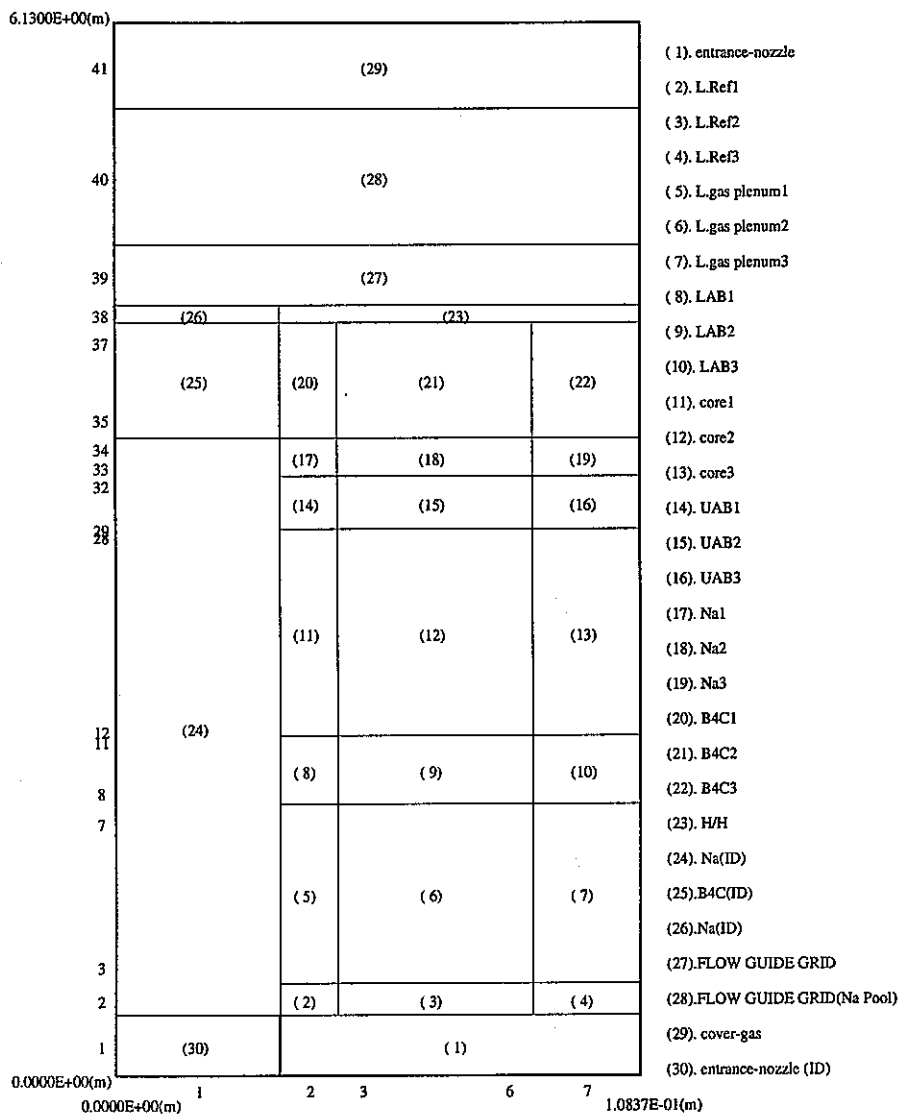


図 3.1 内部ダクト付き集合体（低圧プレナムケース）解析体系図

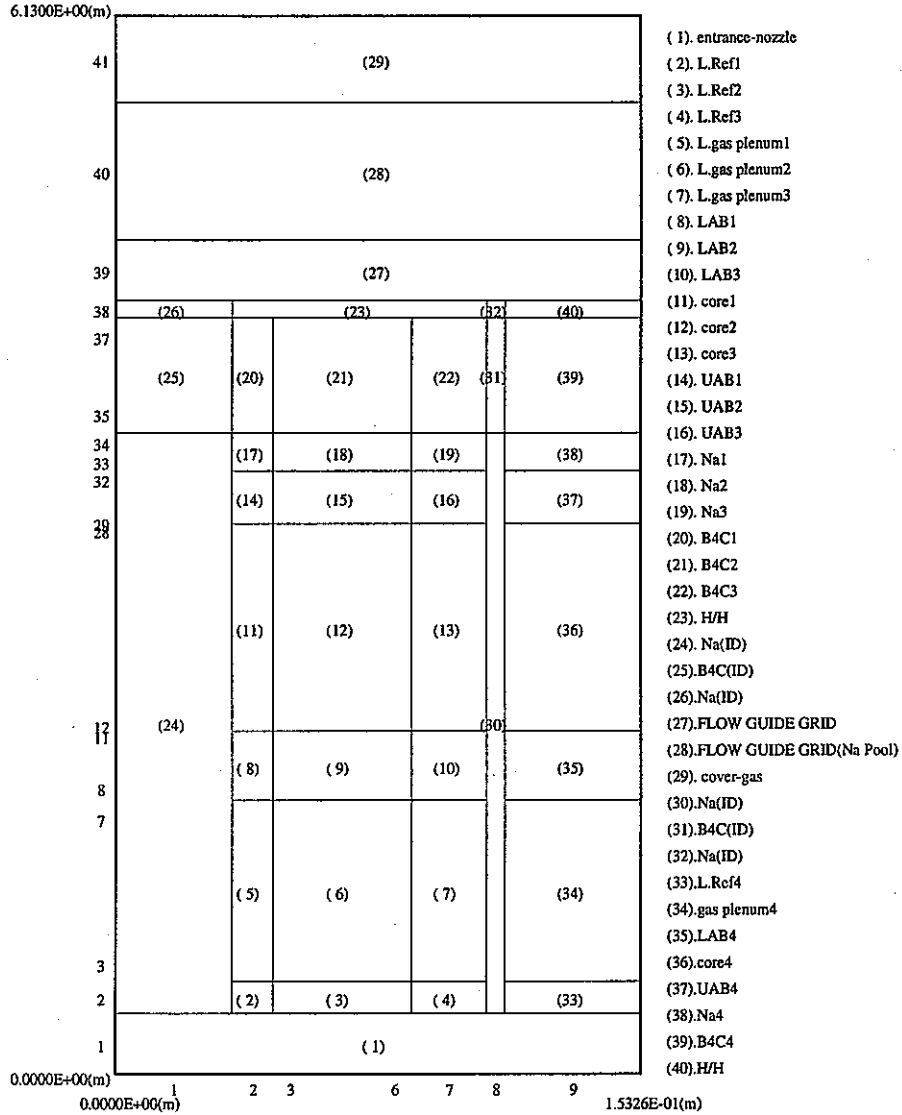


図 3.2 内部ダクト付き集合体（高圧プレナムケース）解析体系図

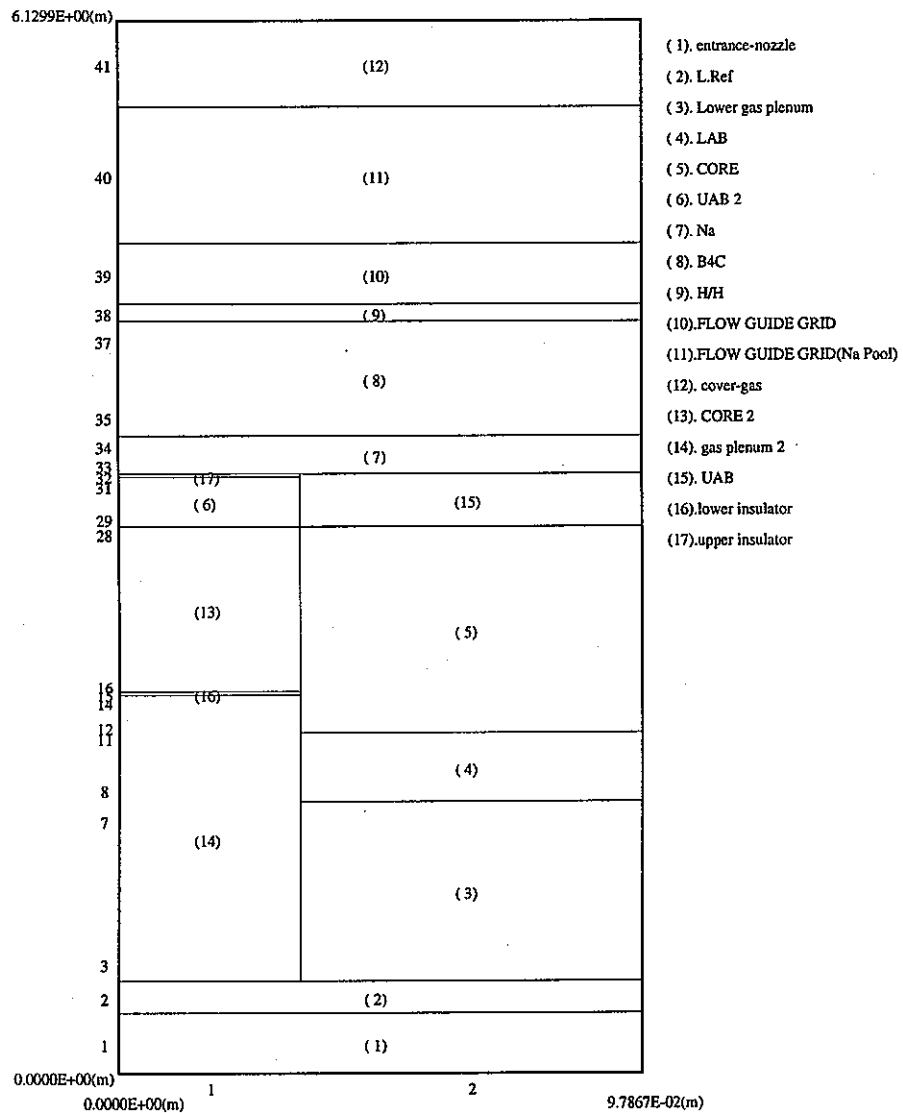


図 3.3 LAB 一部削除型集合体 (燃料短尺/UAB 有り) 解析体系図

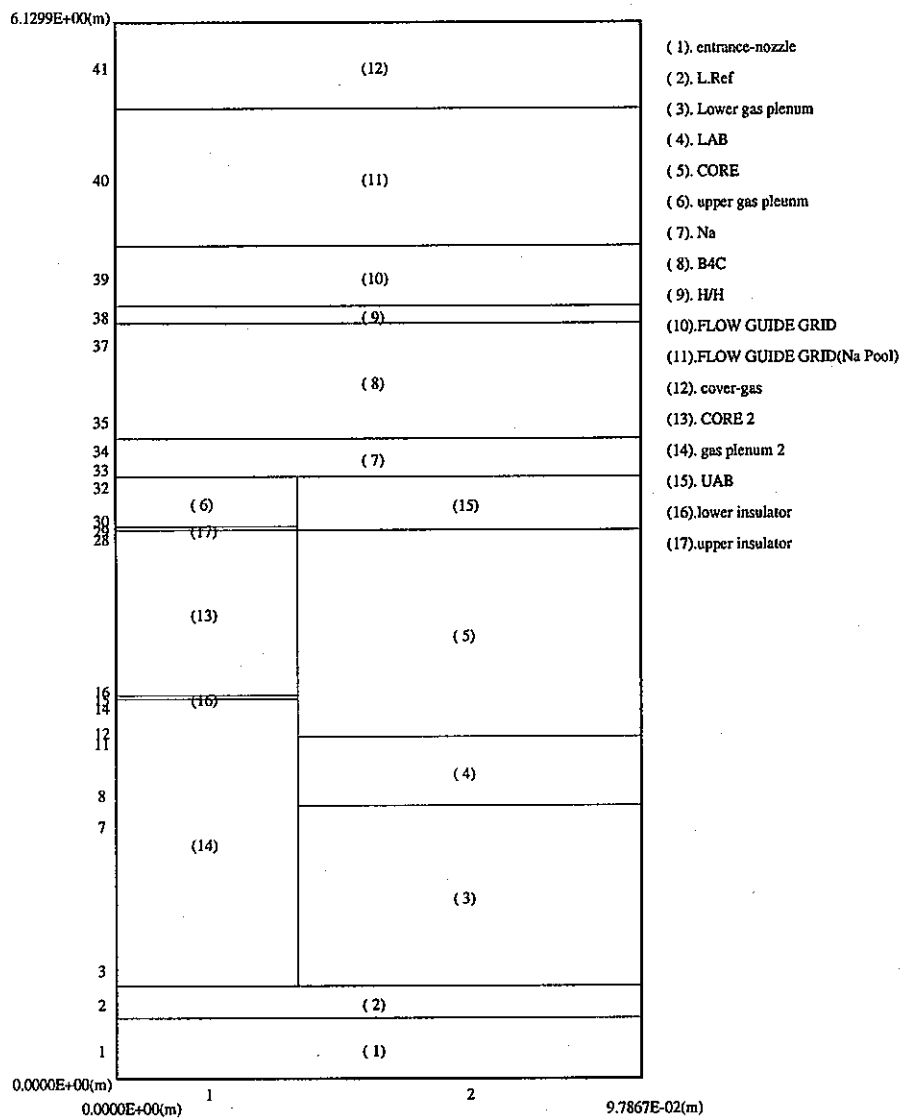


图 3.4 LAB 一部削除型集合体 (燃料短尺/UAB 無し) 解析体系図

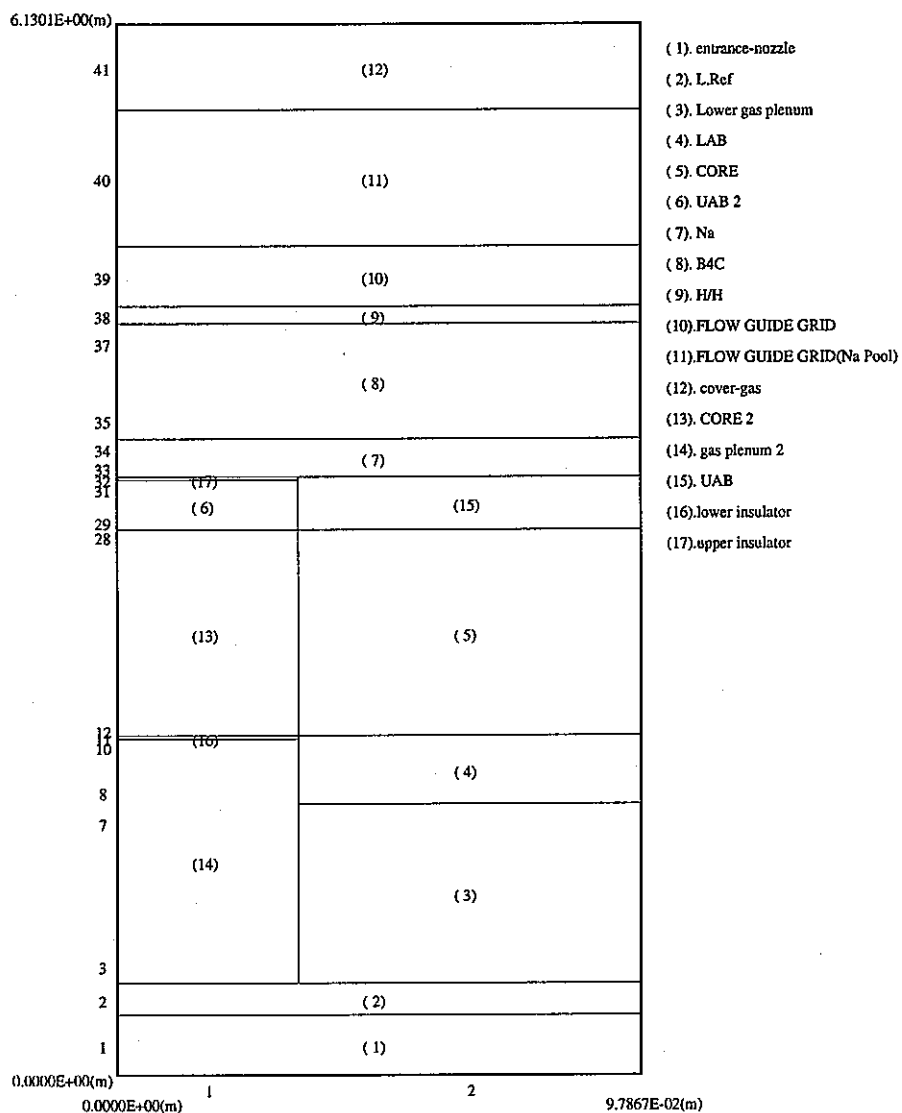


図 3.5 LAB 一部削除型集合体 (LAB のみ削除/UAB 有り) 解析体系図

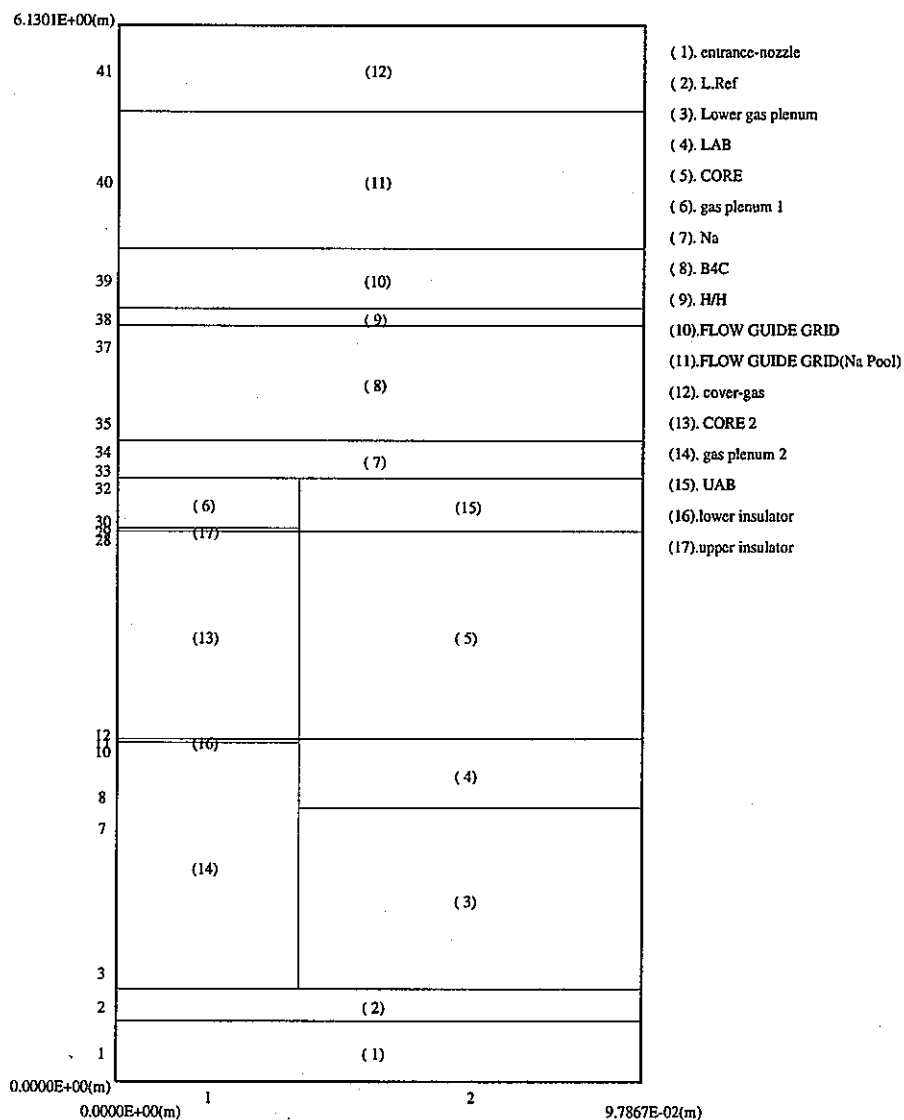


図 3.6 LAB 一部削除型集合体 (LAB のみ削除/UAB 無し) 解析体系図

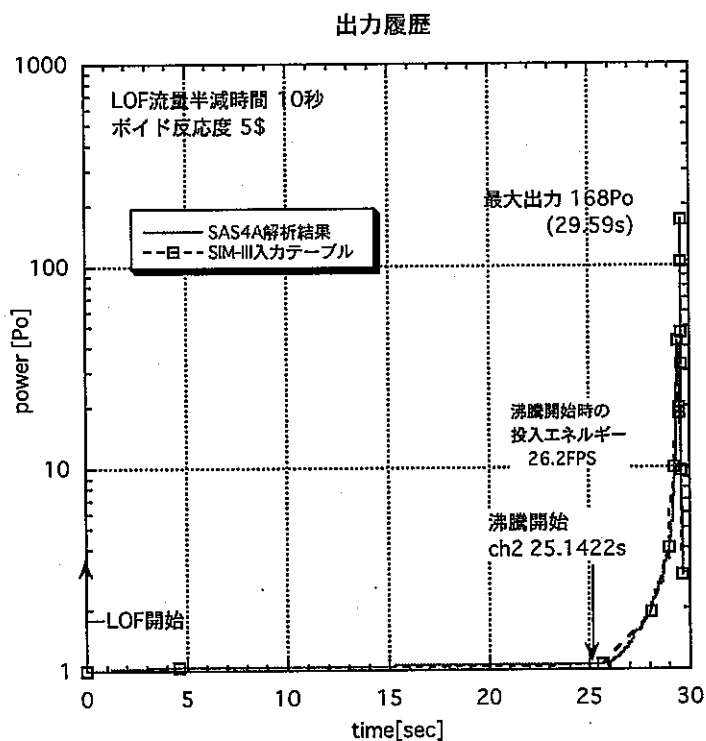


図 3.7 出力履歴 (1) 全体

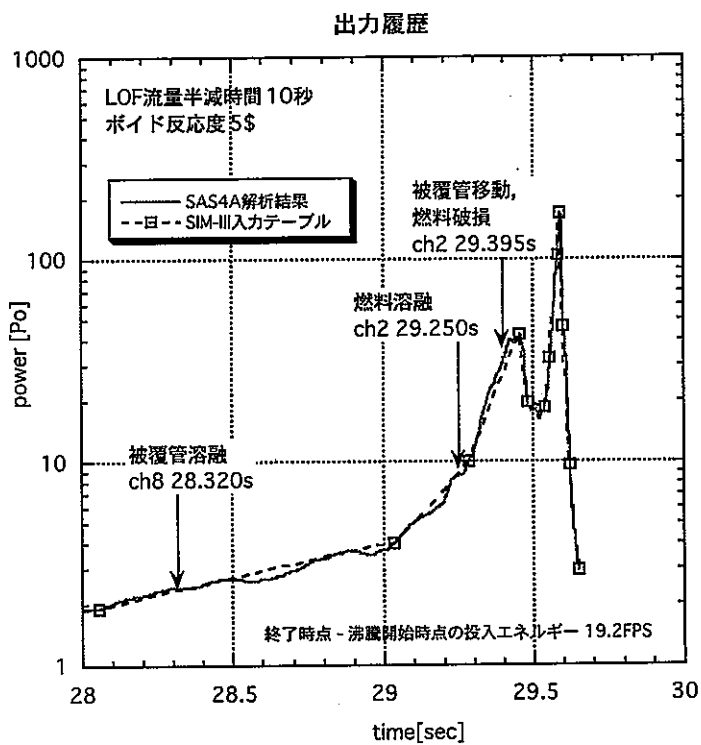
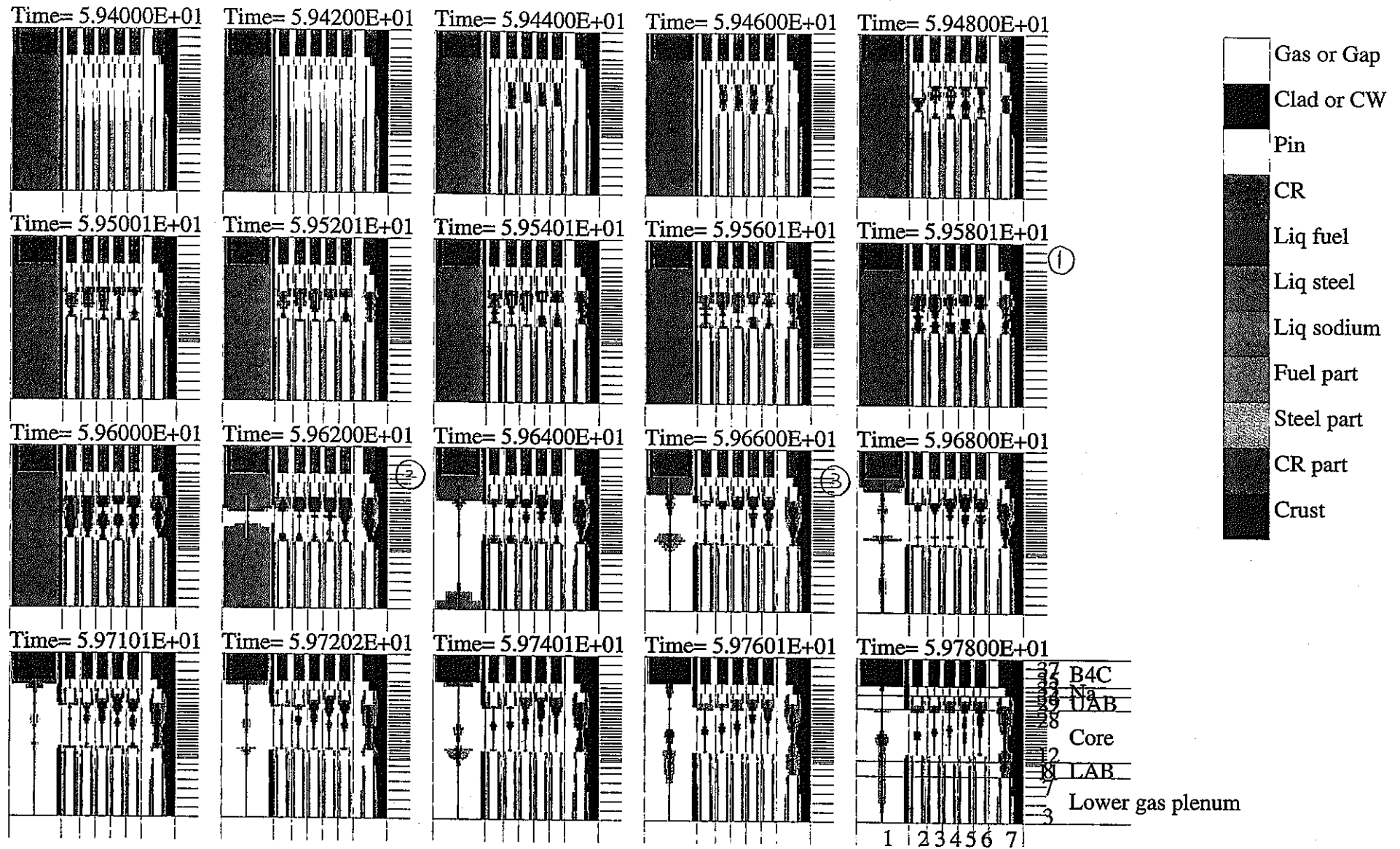
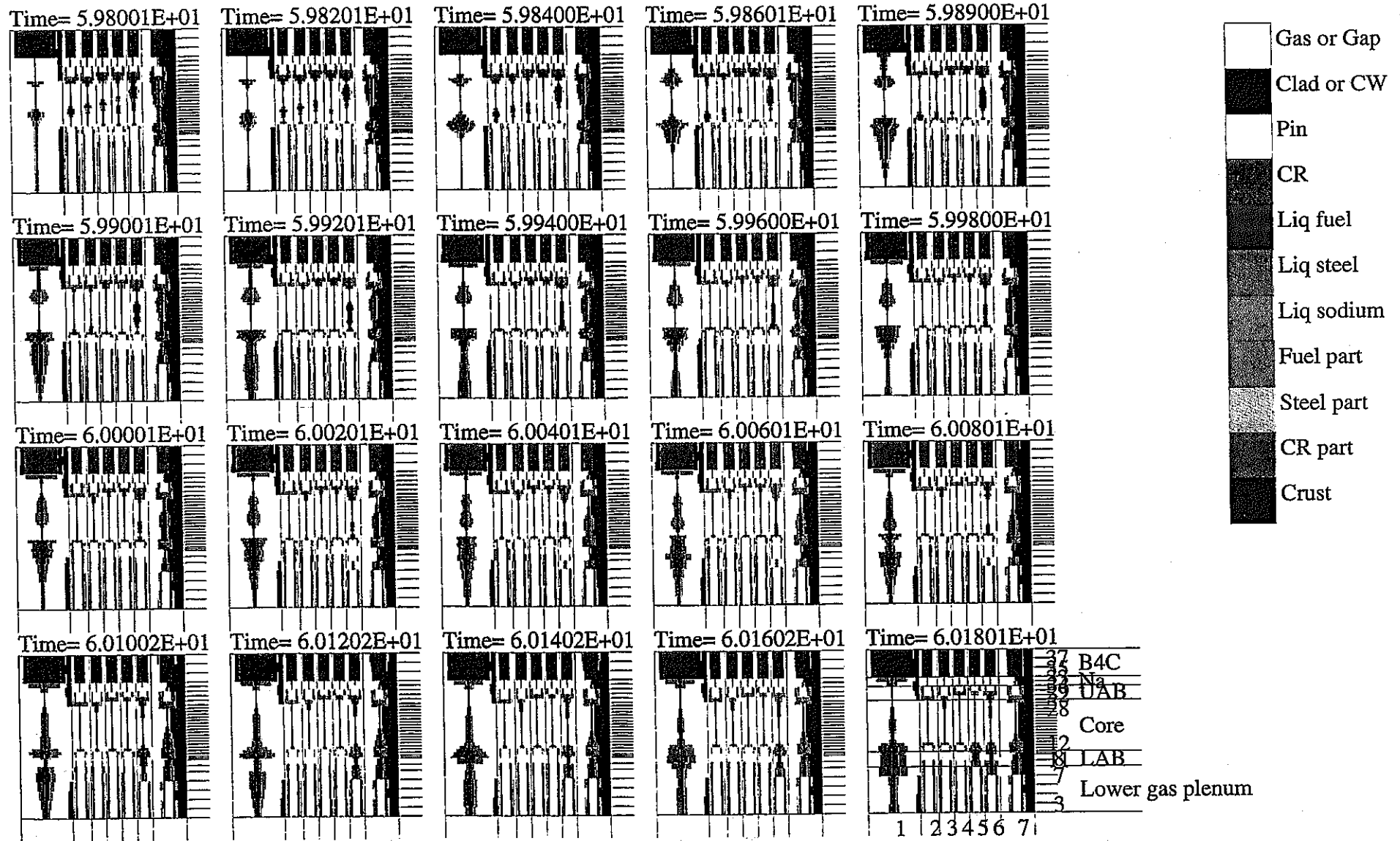


図 3.7 出力履歴 (2) 拡大



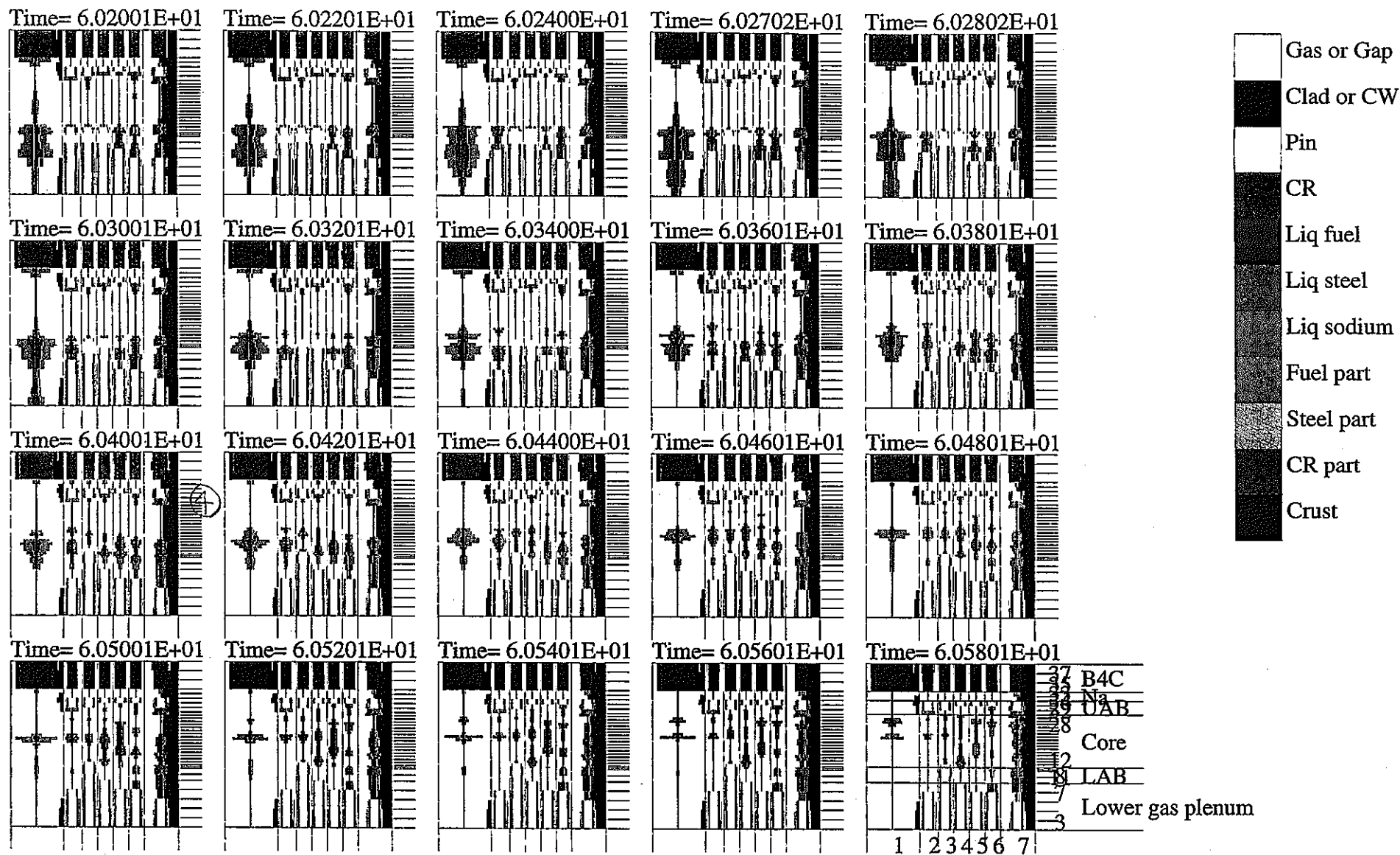
[i= 1, 7] [j= 3, 37]

図 4.1.(1)-1 各成分体積率 (低圧プレナムケース) (1/4)



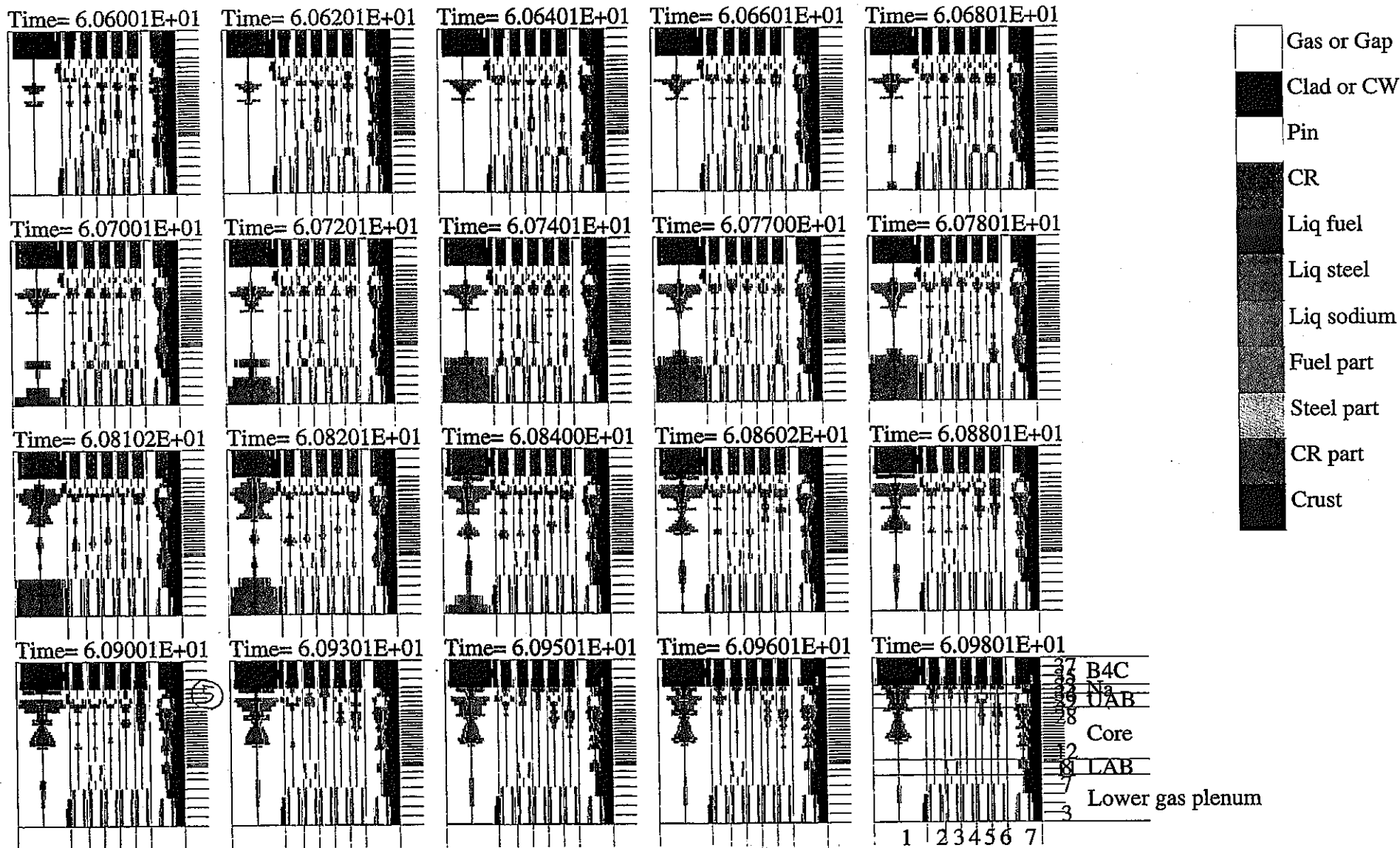
[i= 1, 7] [j= 3, 37]

図 4.1.(1)-1 各成分体積率 (低圧プレナムケース) (2/4)



[i= 1, 7] [j= 3, 37]

図 4.1.(1)-1 各成分体積率 (低圧プレナムケース) (3/4)



[i= 1, 7] [j= 3, 37]

図 4.1.(1)-1 各成分体積率 (低圧プレナムケース) (4/4)

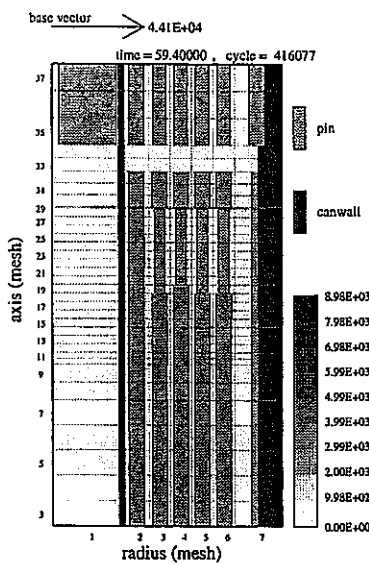


Figure 1. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

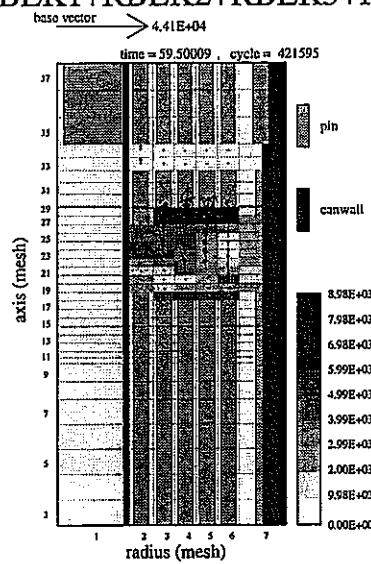


Figure 2. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

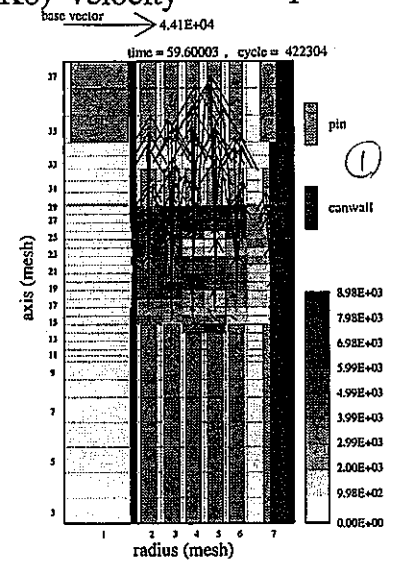


Figure 3. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

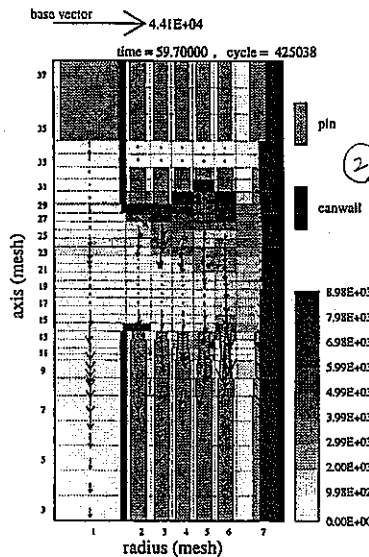


Figure 4. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

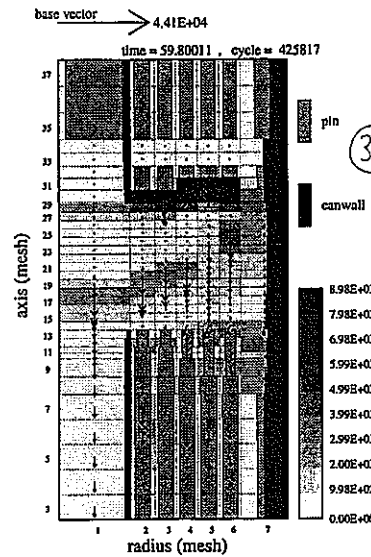


Figure 5. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

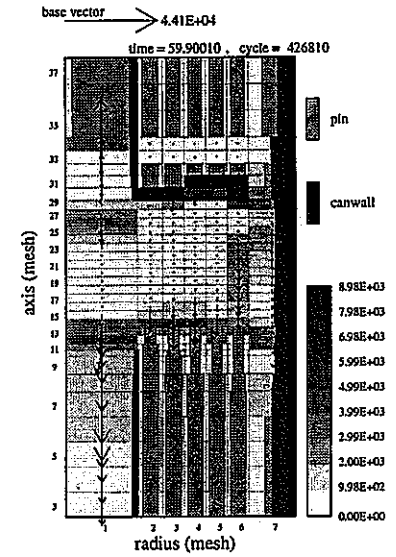


Figure 6. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

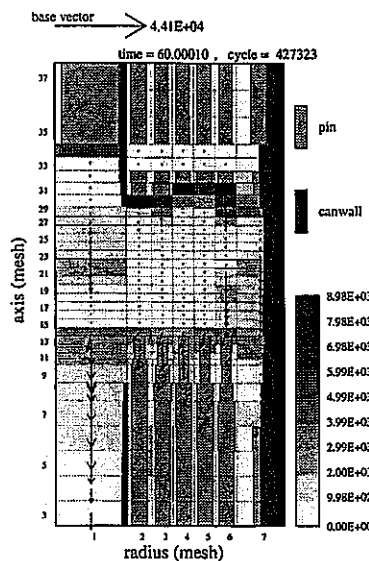


Figure 7. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

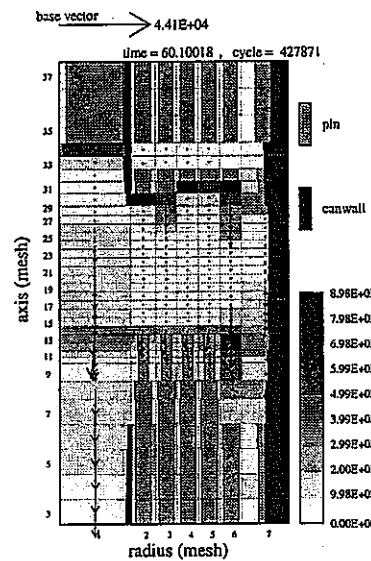


Figure 8. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

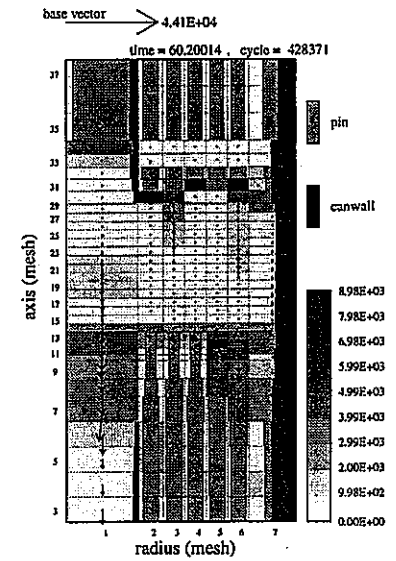


Figure 9. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.1.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (低圧プレナムケース) (1/2)

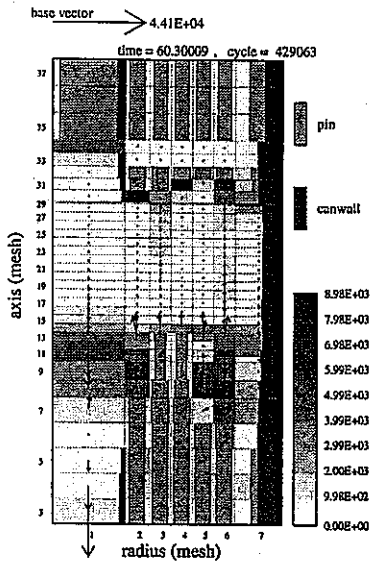


Figure 10. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

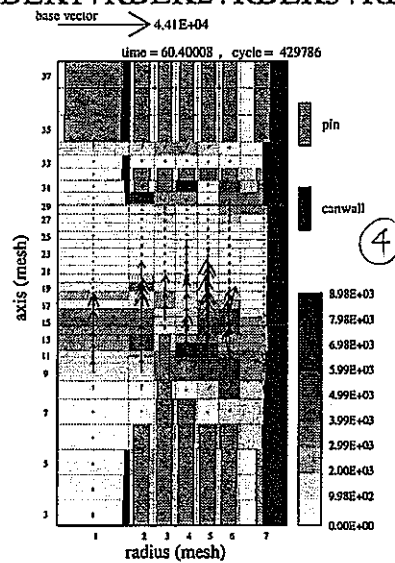


Figure 11. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

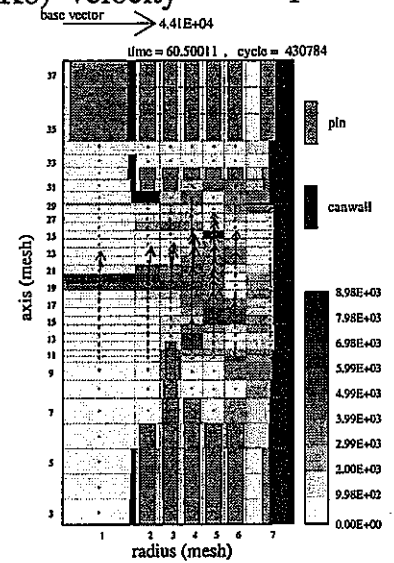


Figure 12. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

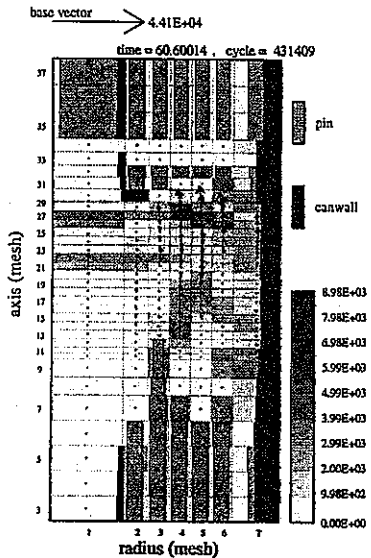


Figure 13. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

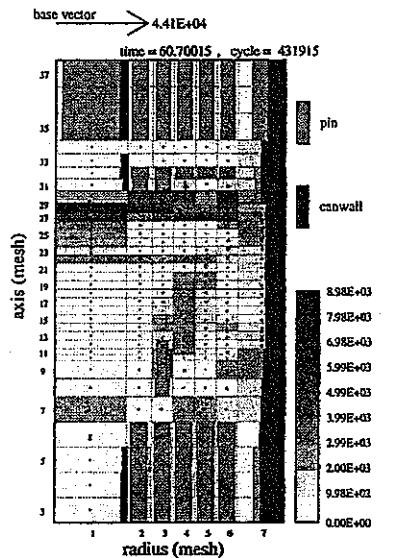


Figure 14. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

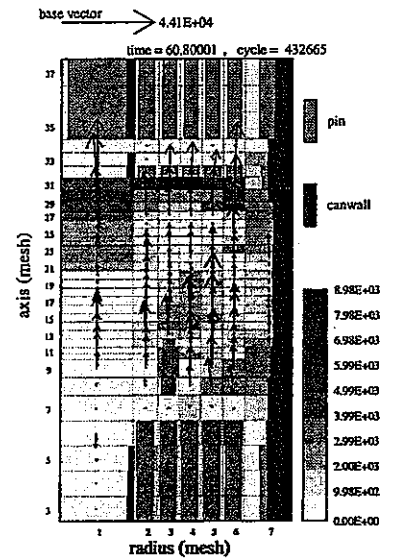


Figure 15. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

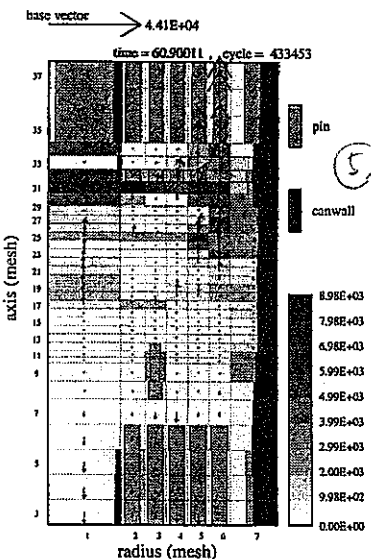


Figure 16. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

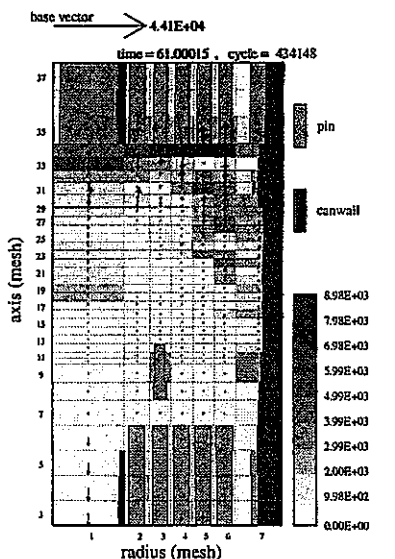


Figure 17. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

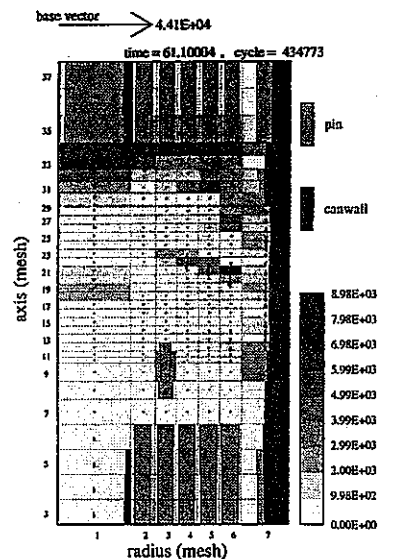


Figure 18. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.1.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (低圧プレナムケース) (2/2)

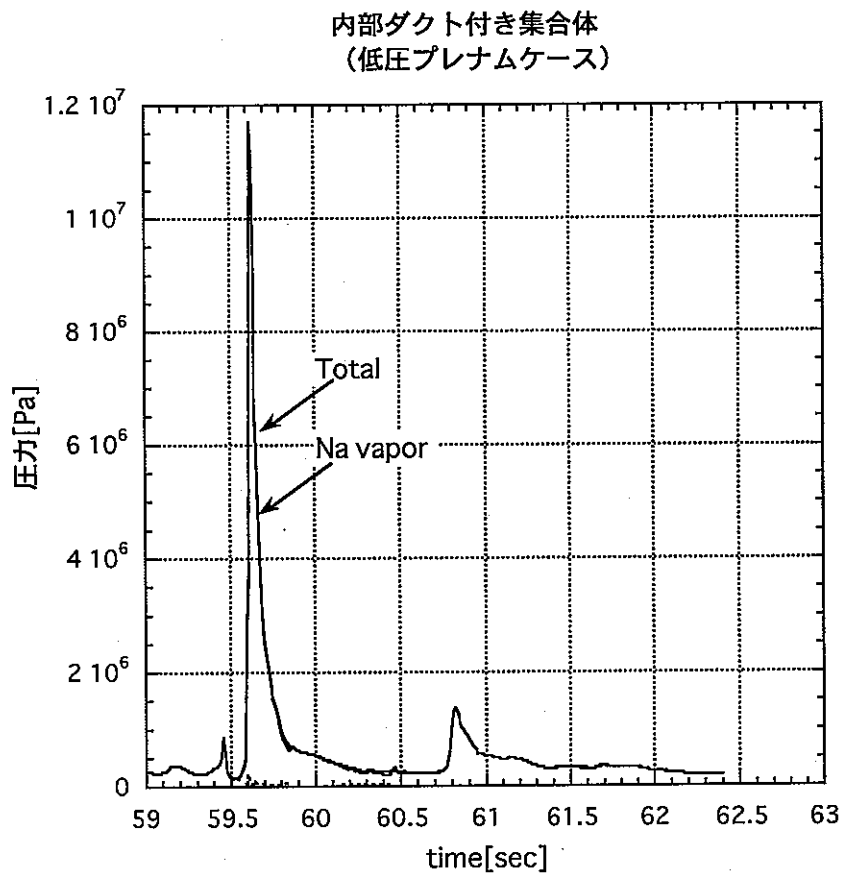
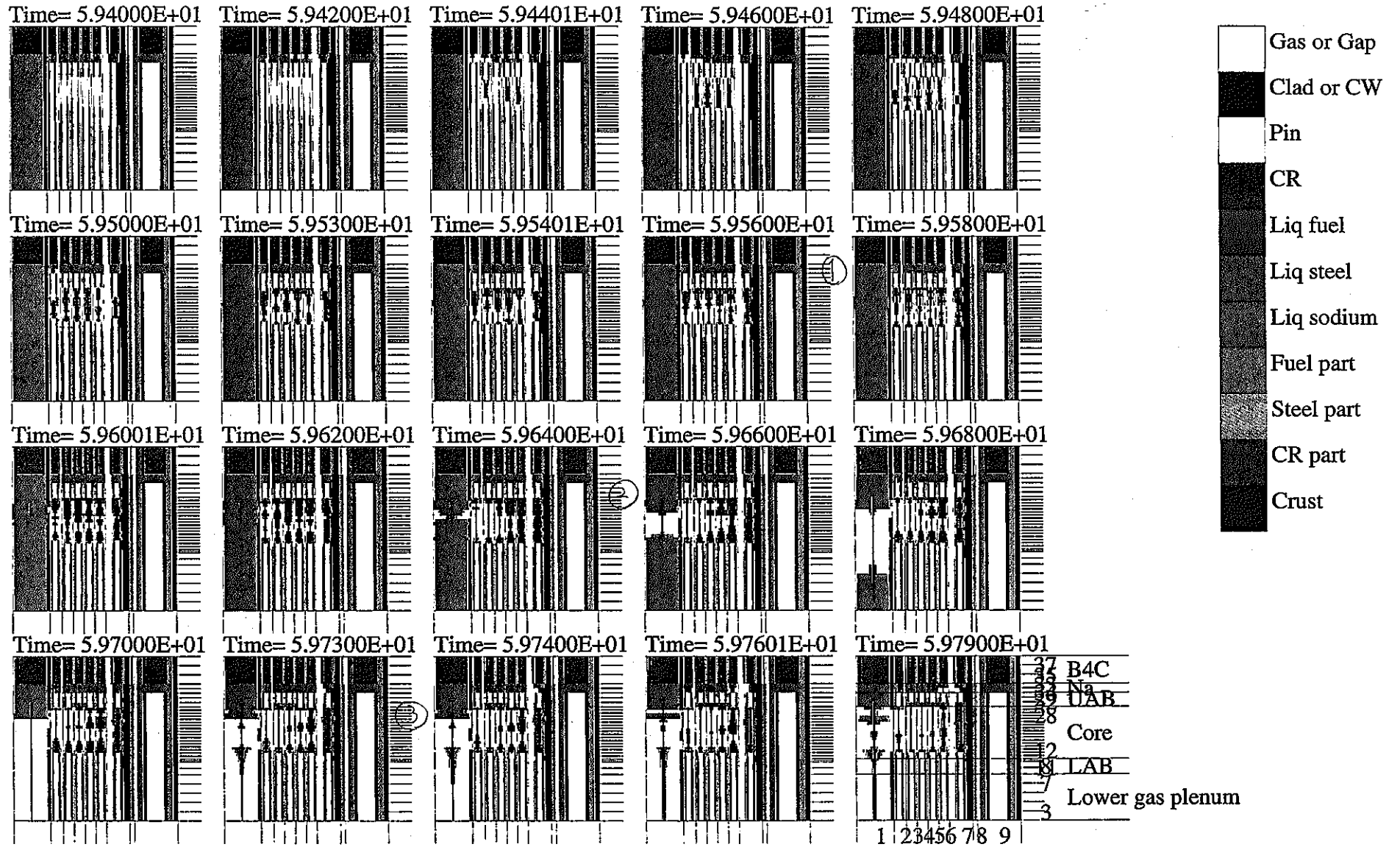
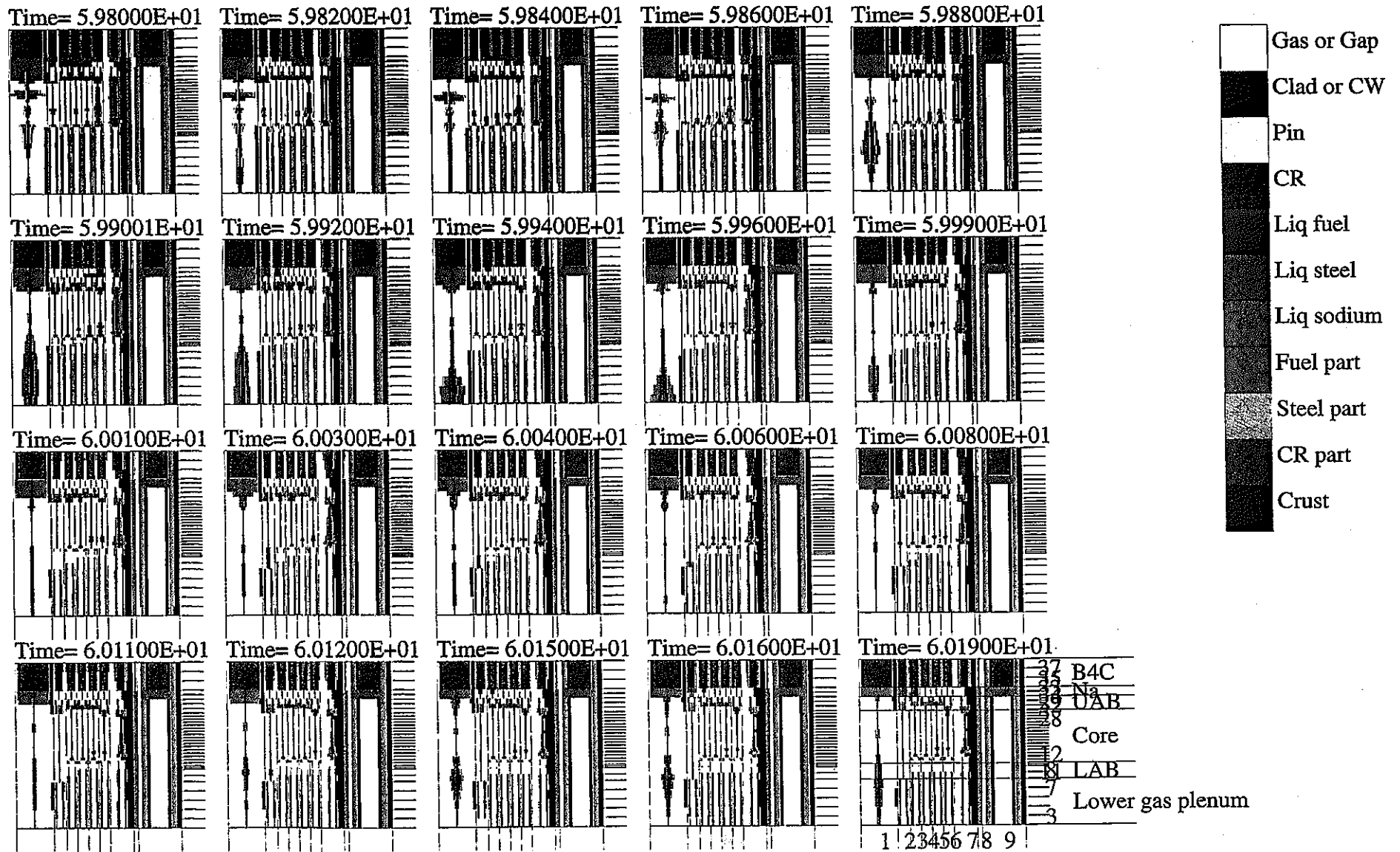


図 4.1.(1)-4 炉心燃料領域の圧力履歴 (低圧プレナムケース)



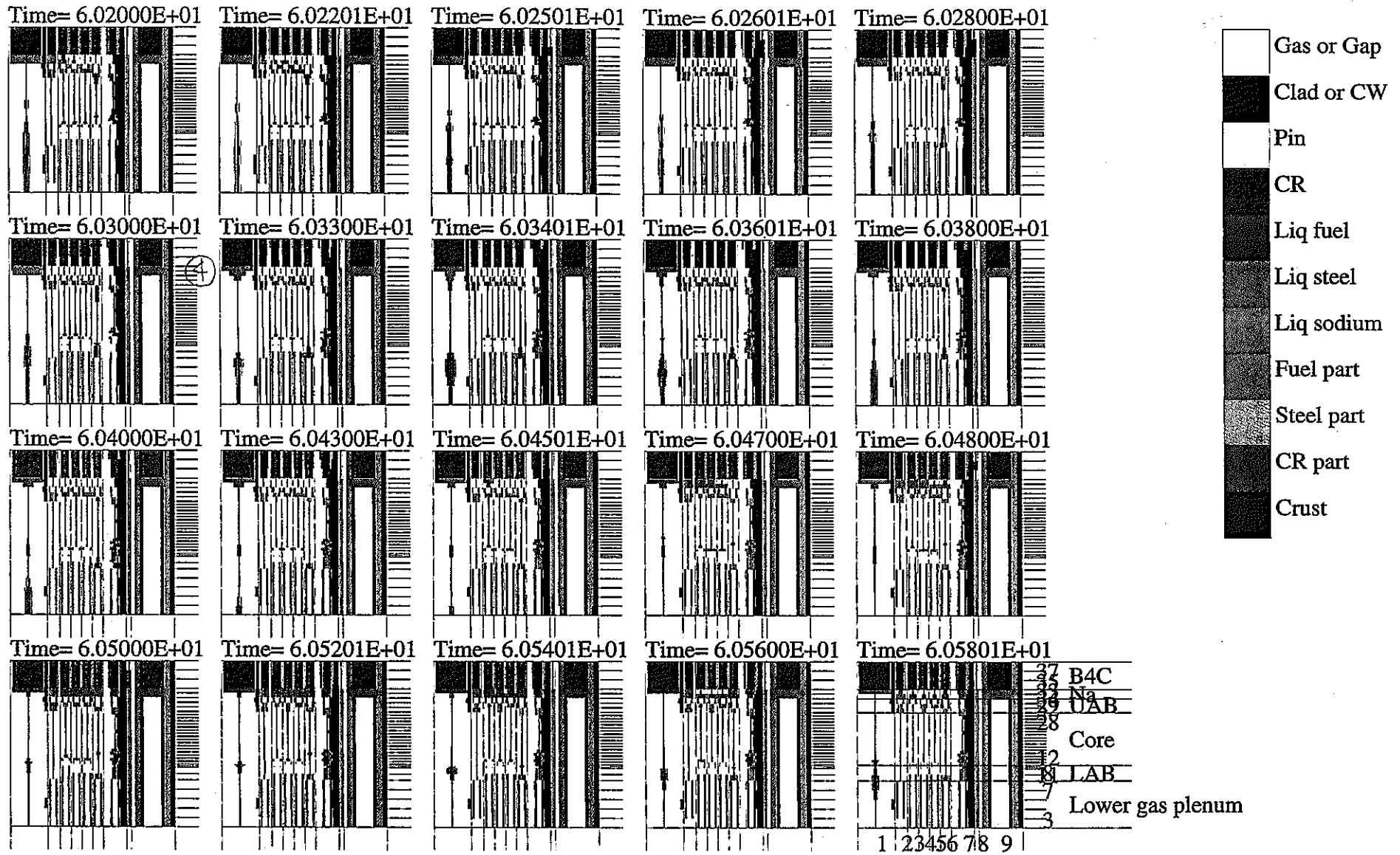
[i= 1, 9] [j= 3, 37]

図 4.1.(2)-1 各成分体積率 (高圧プレナムケース) (1/3)



[i= 1, 9] [j= 3, 37]

図 4.1.(2)-1 各成分体積率 (高圧プレナムケース) (2/3)



[i= 1, 9] [j= 3, 37]

図 4.1.(2)-1 各成分体積率 (高圧プレナムケース) (3/3)

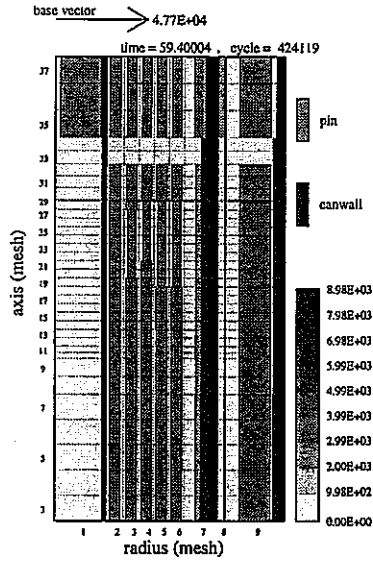


Figure 1. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

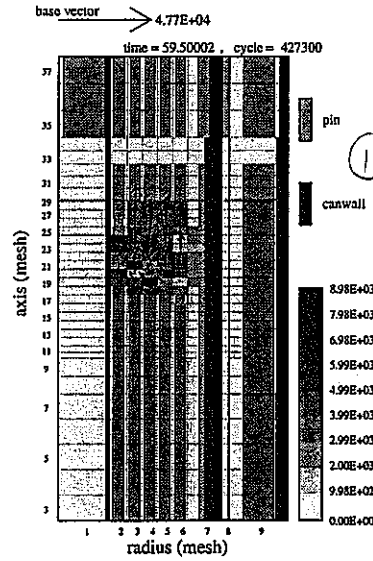


Figure 2. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

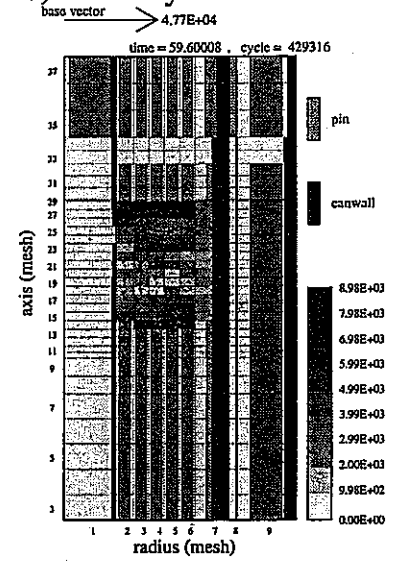


Figure 3. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

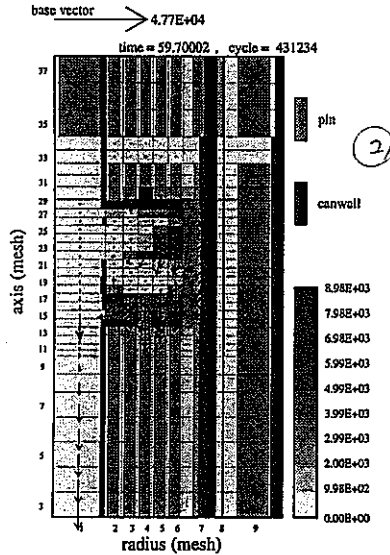


Figure 4. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

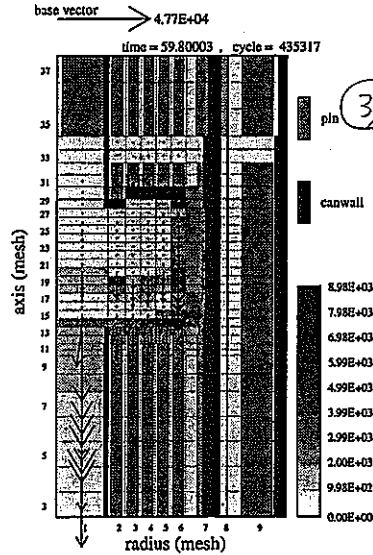


Figure 5. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

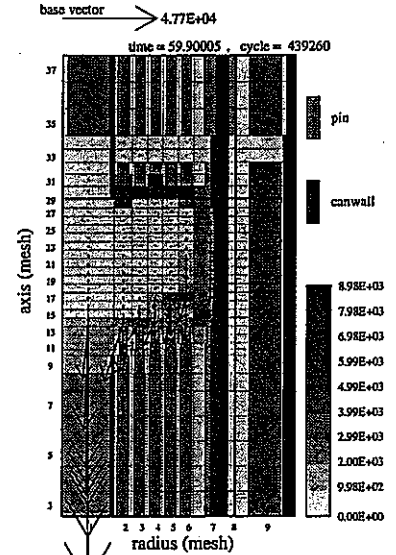


Figure 6. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

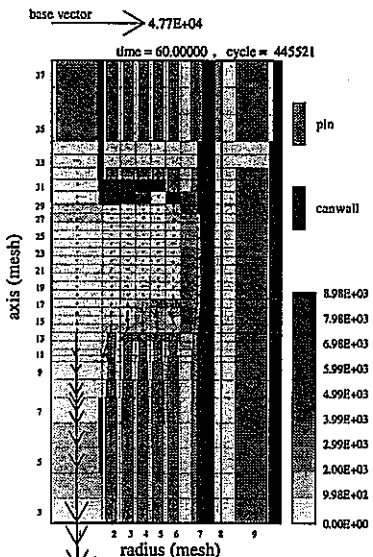


Figure 7. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

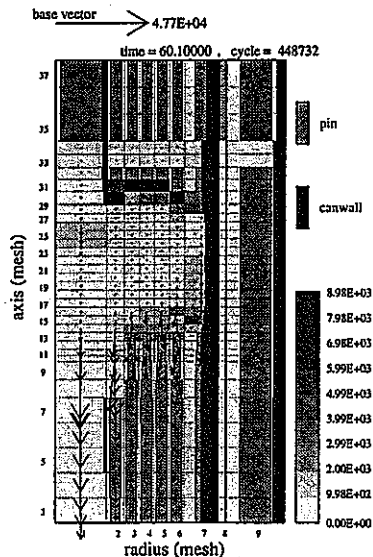


Figure 8. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

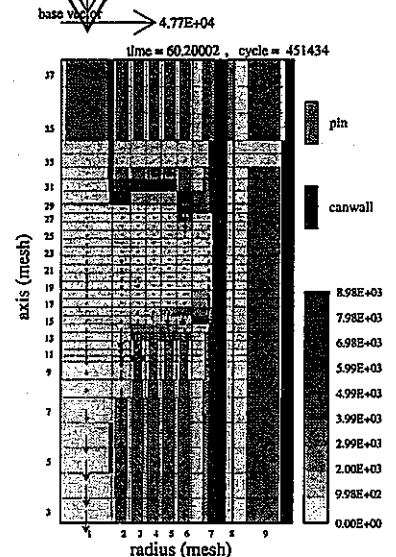


Figure 9. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.1.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (高圧プレナムケース) (1/2)

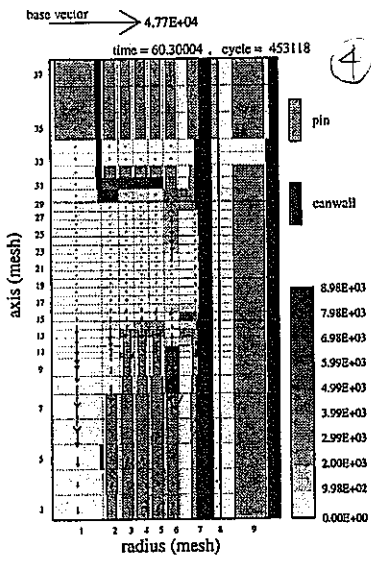


Figure 10. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

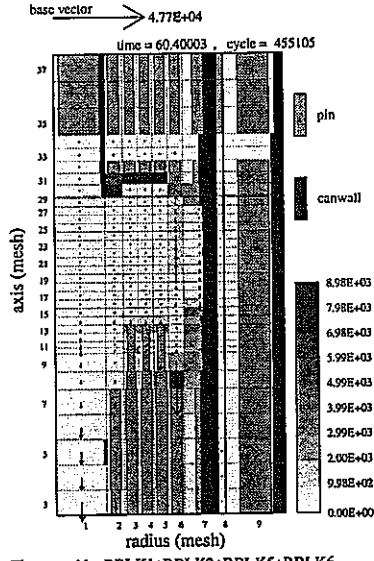


Figure 11. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

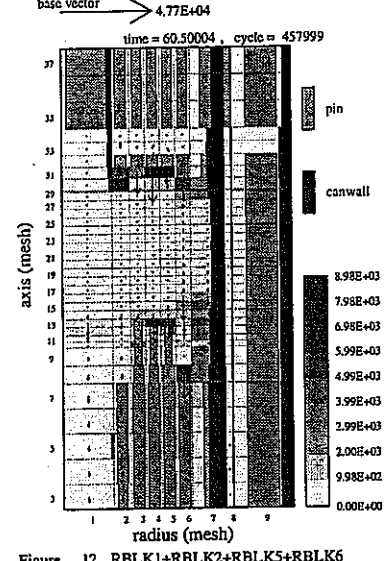


Figure 12. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.1.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (高圧プレナムケース) (2/2)

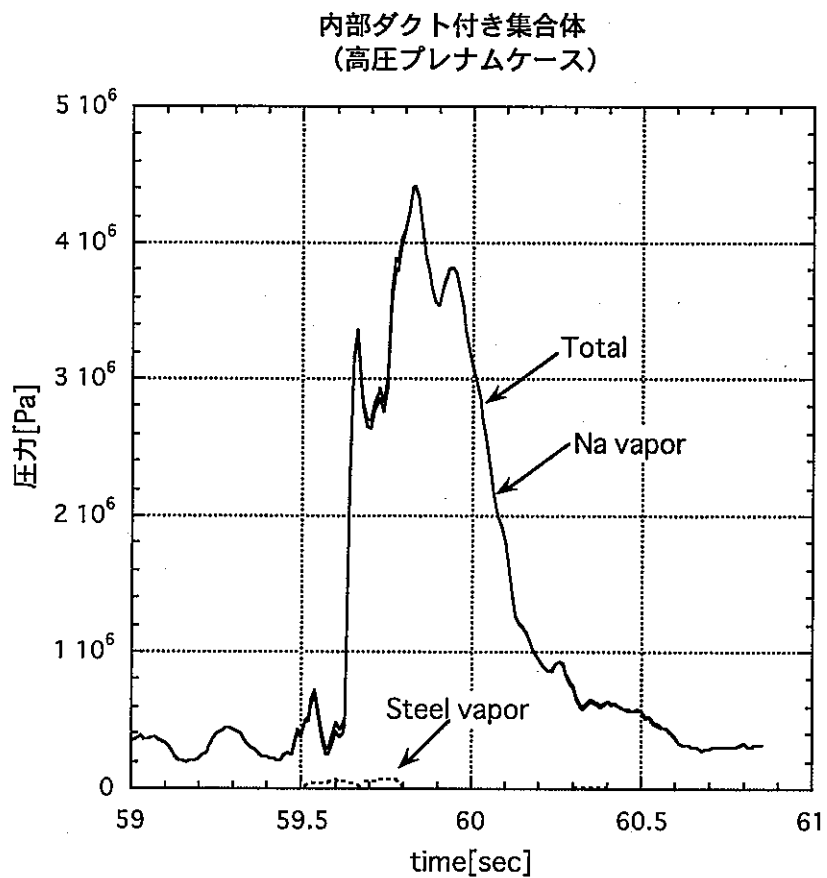


図 4.1.(2)-4 炉心燃料領域の圧力履歴 (高圧プレナムケース)

内部ダクト付き集合体
 高圧プレナムケース/低圧プレナムケース

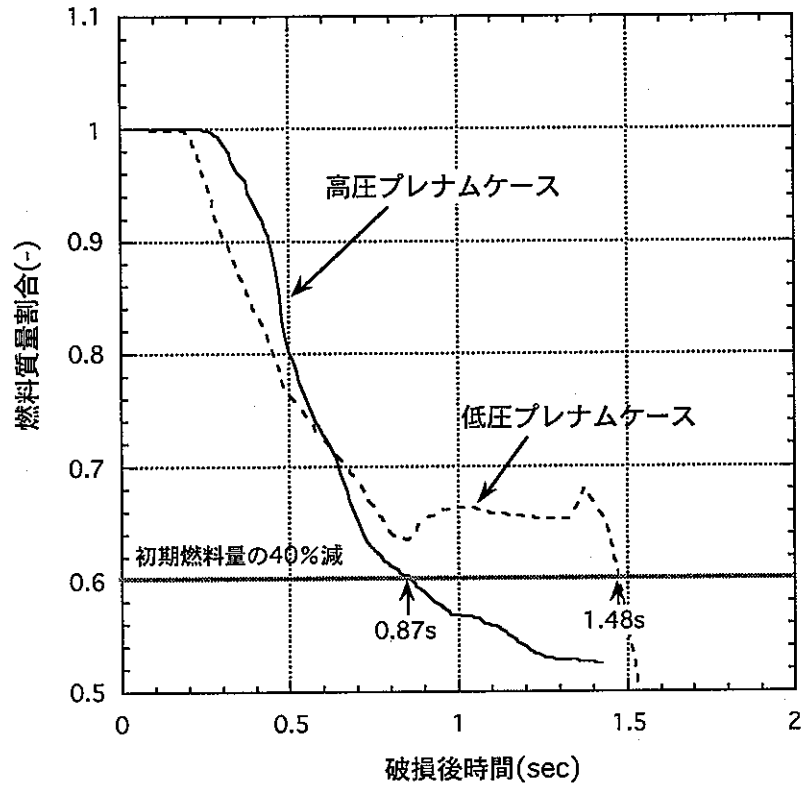
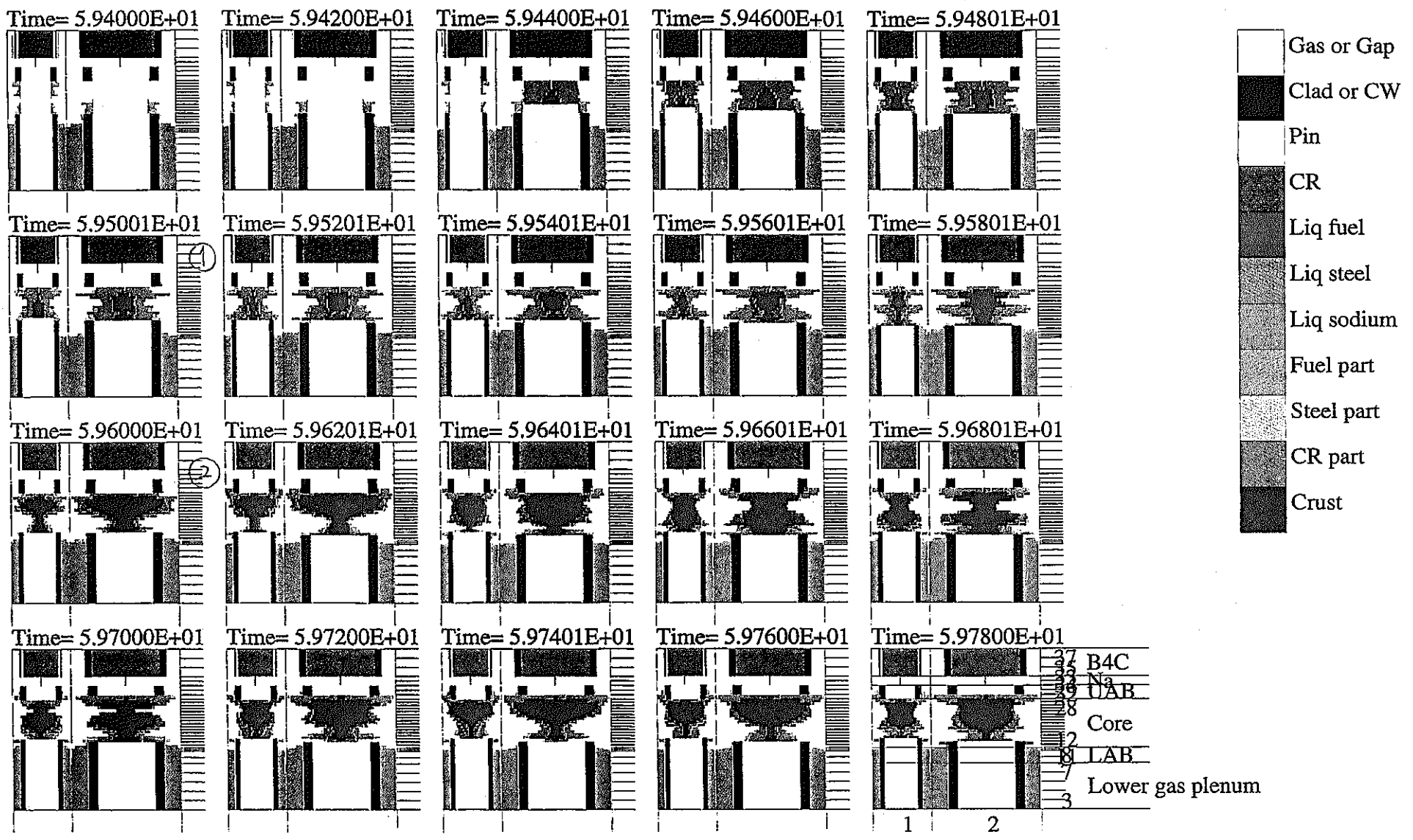


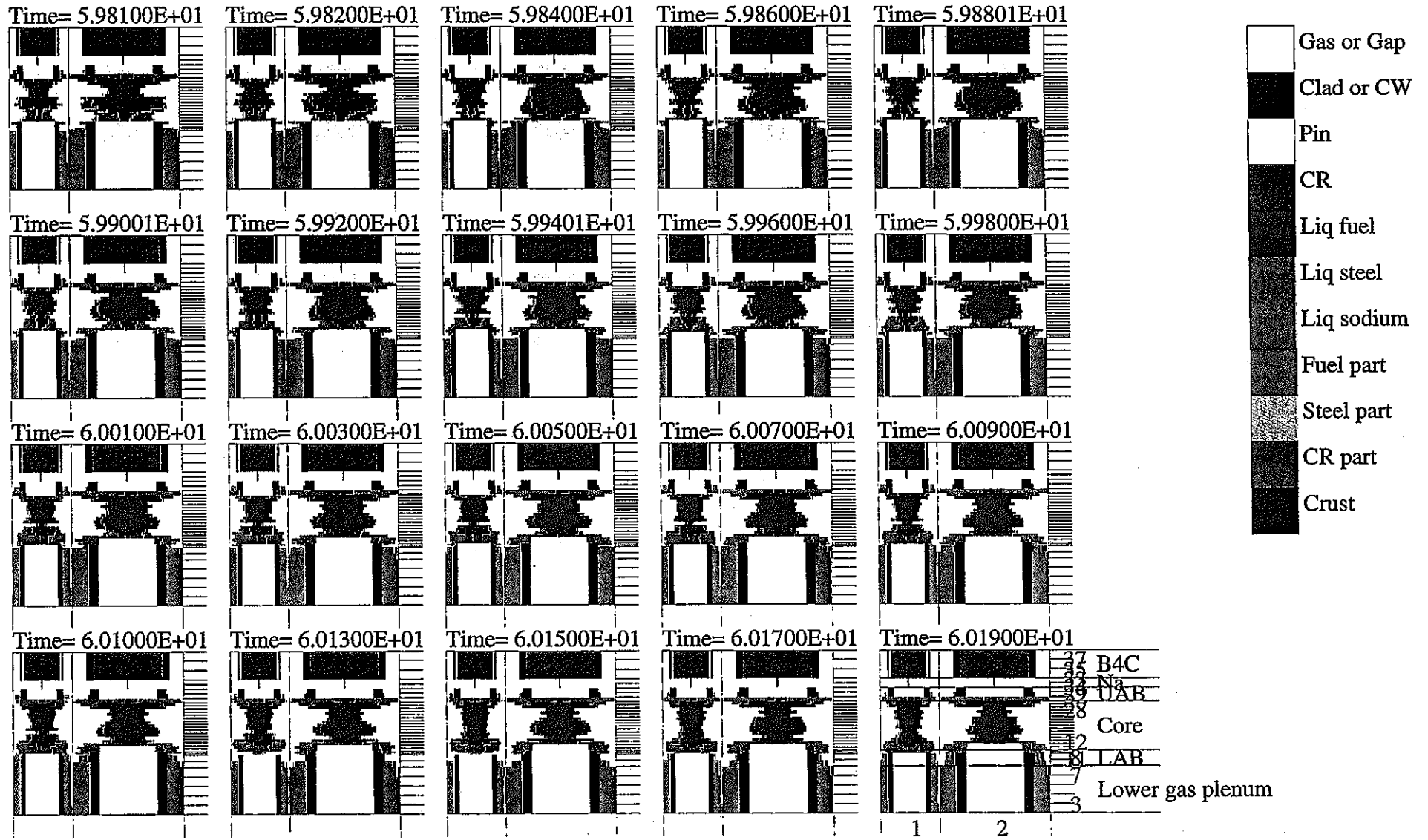
図 4.1.(3)-1 燃料流出挙動の比較



-46-

[i= 1, 2] [j= 3, 37]

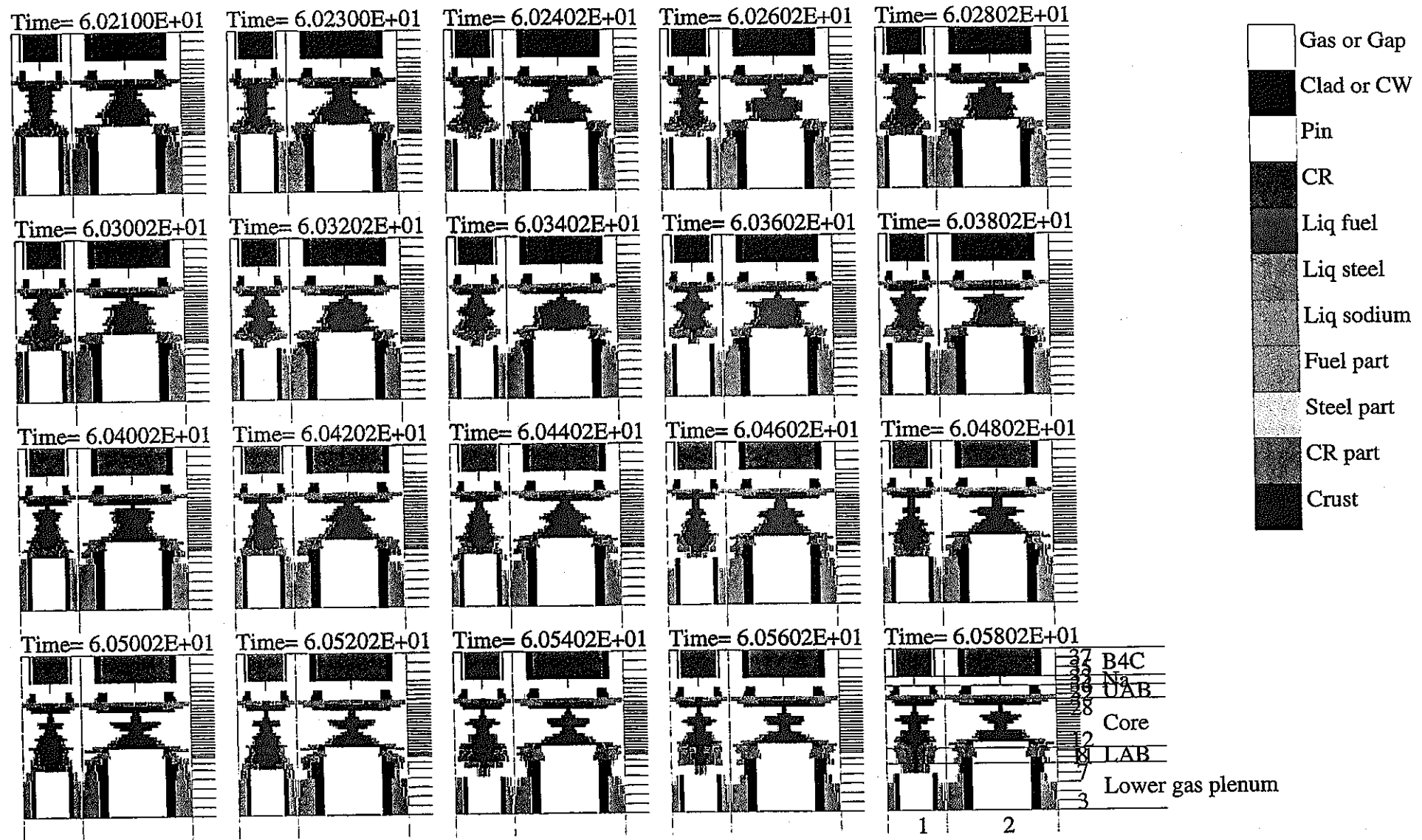
图 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (1/8)



-47-

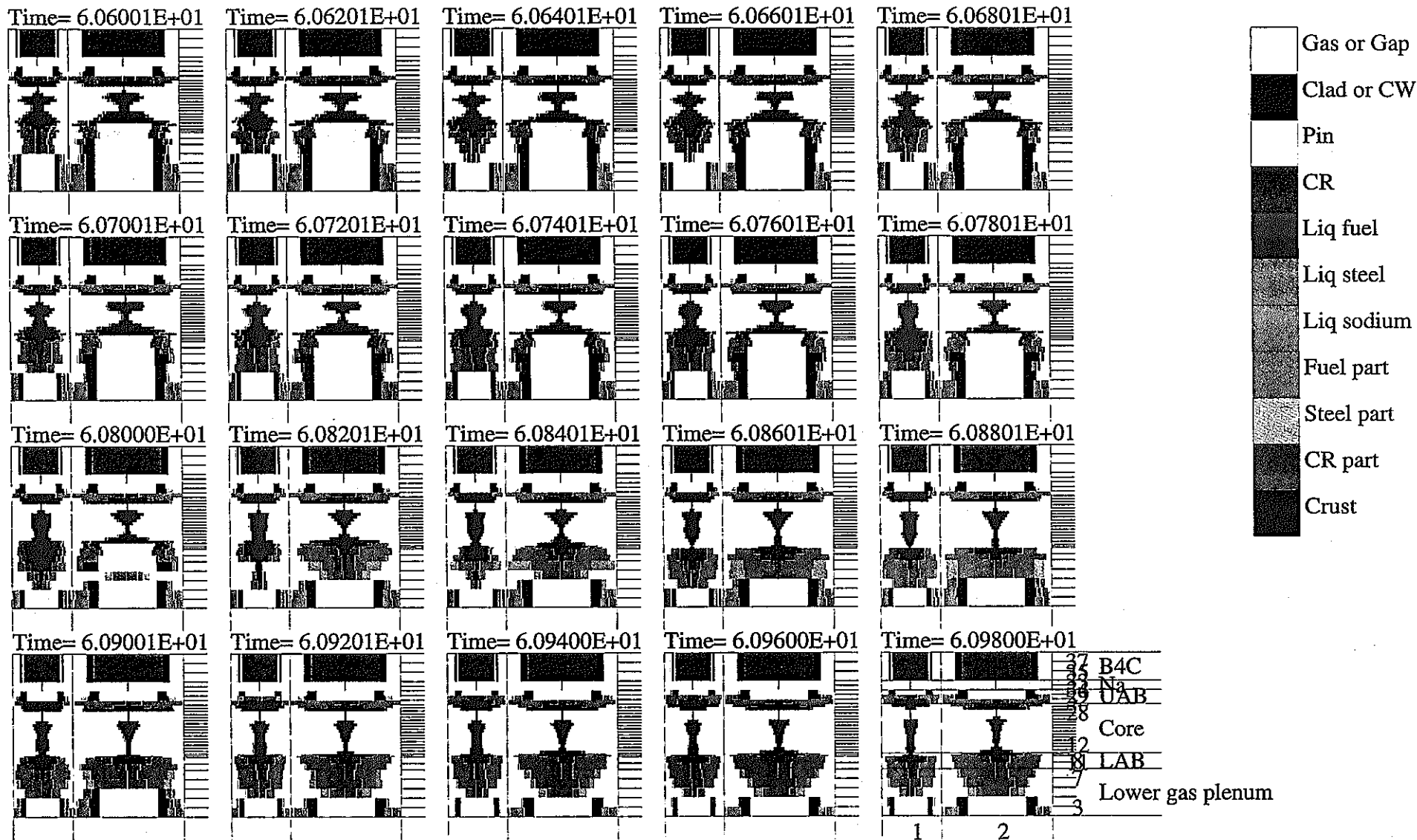
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (2/8)



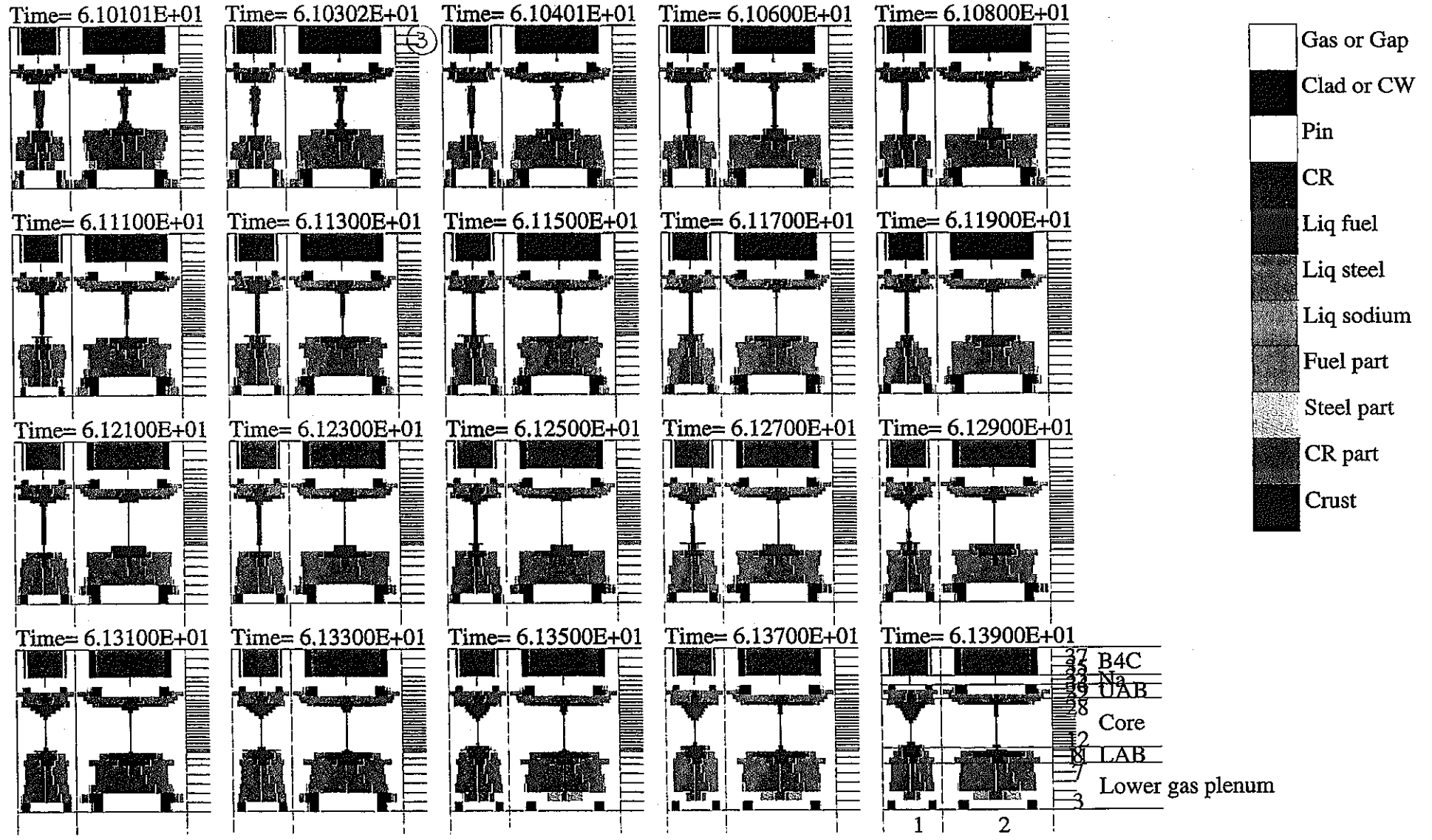
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (3/8)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

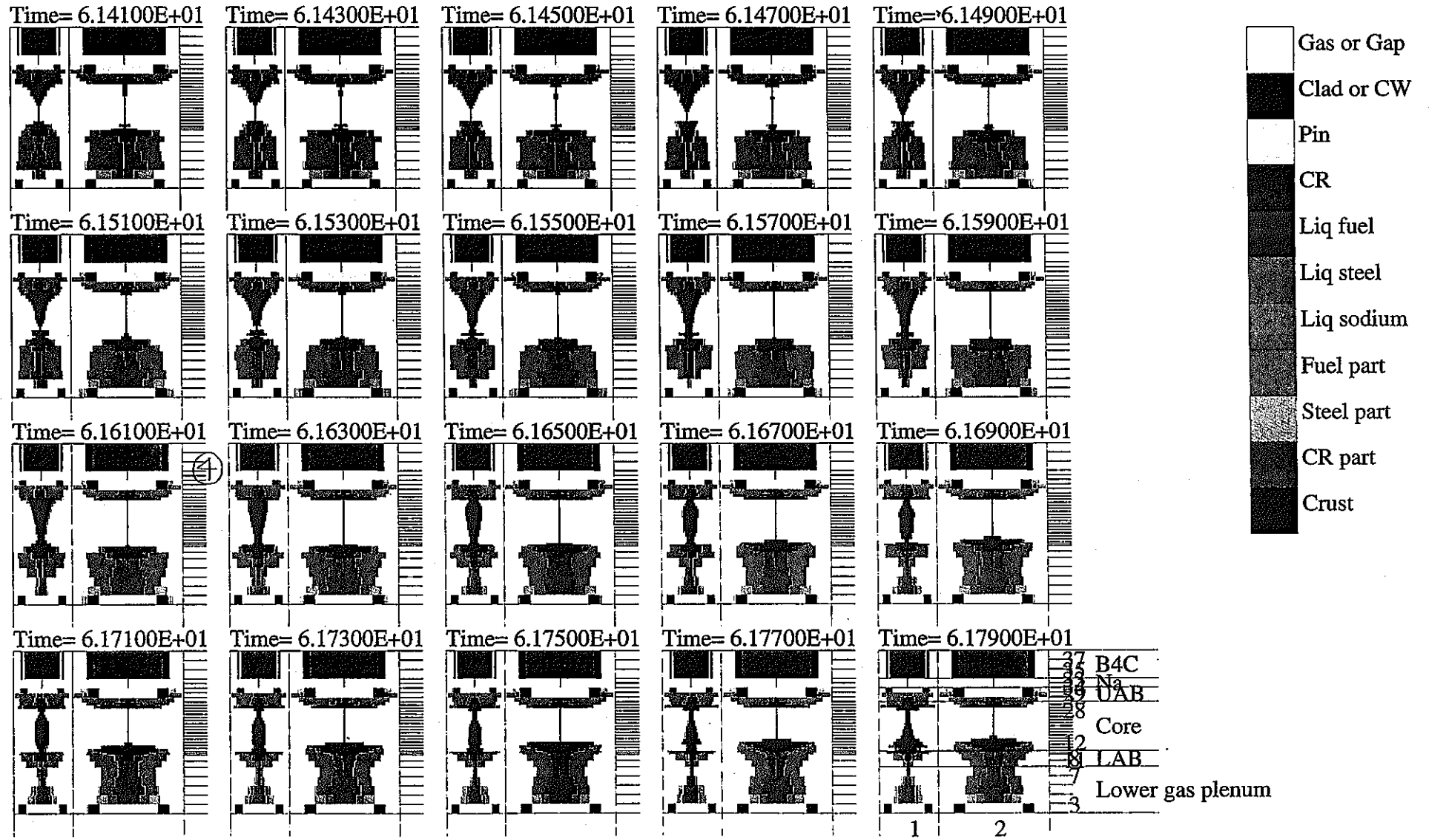
图 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (4/8)



—50—

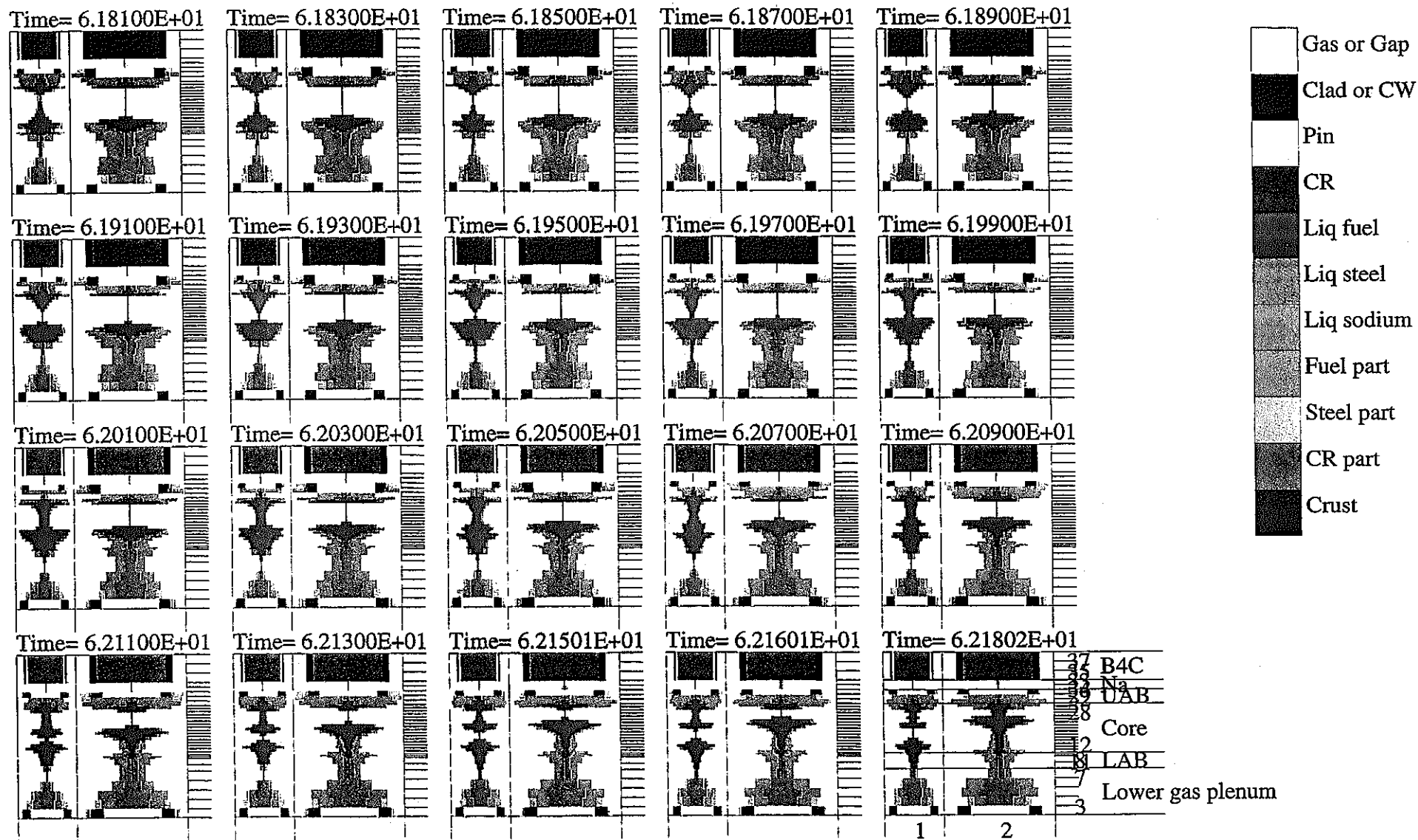
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (5/8)



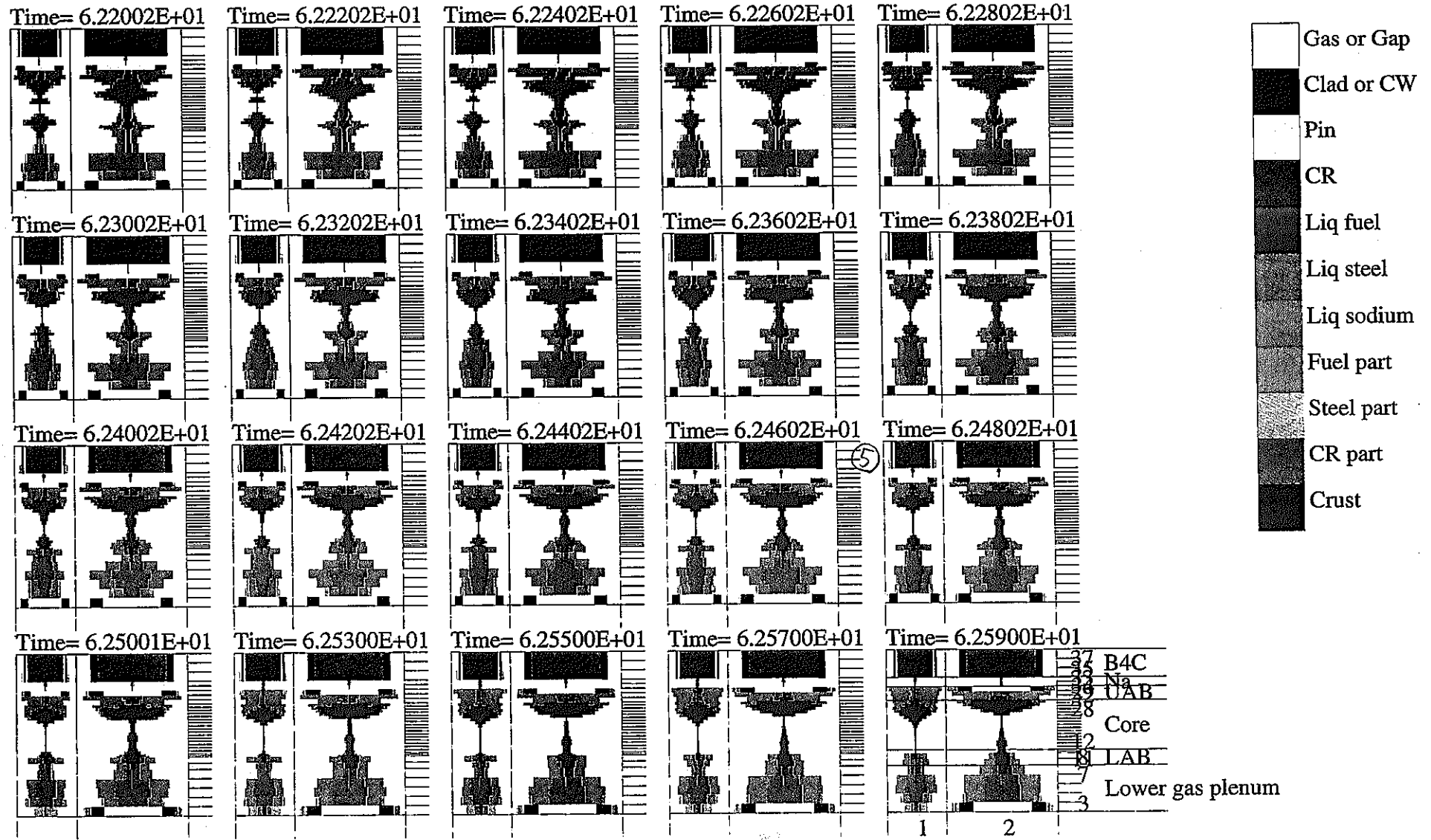
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

图 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (6/8)



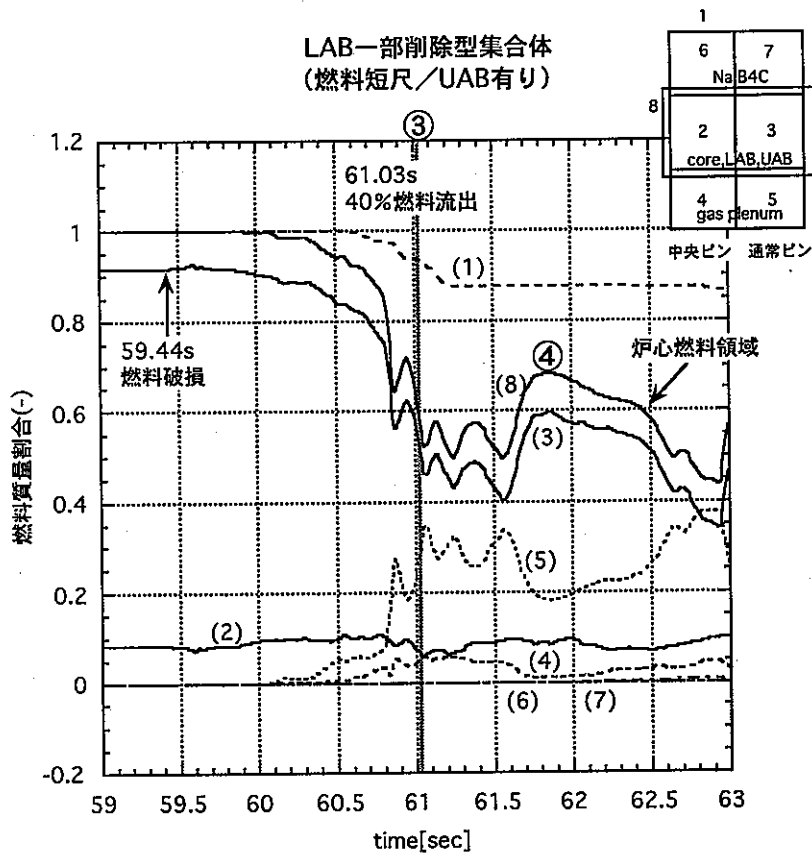
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

图 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (7/8)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

图 4.2.(1)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 有り) (8/8)



40%流出時点の燃料質量分布

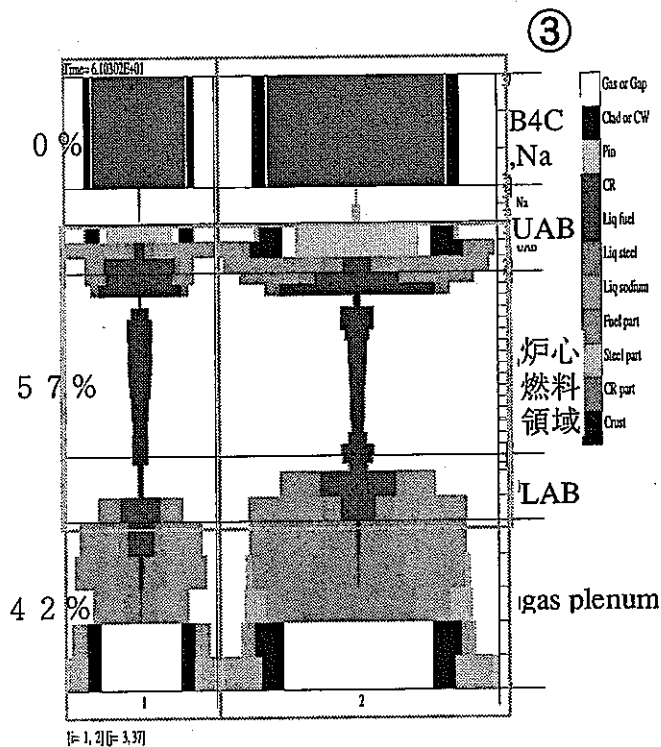


図 4.2.(1)-2 各領域の燃料質量推移 (燃料短尺/UAB 有り)

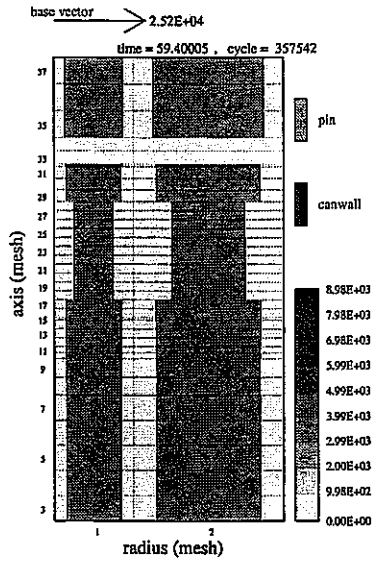


Figure 1. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

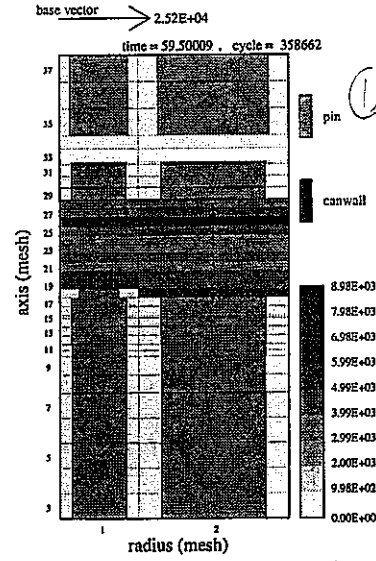


Figure 2. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

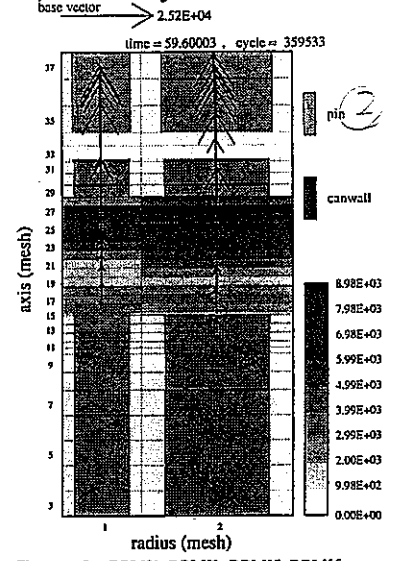


Figure 3. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

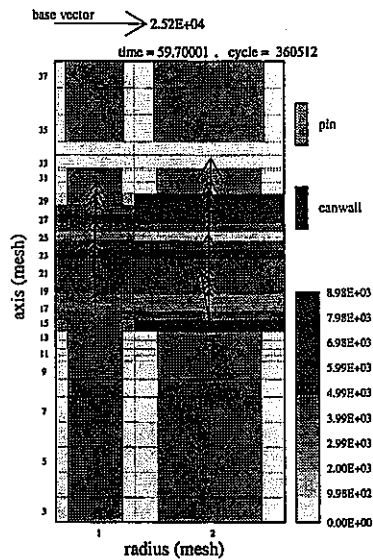


Figure 4. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

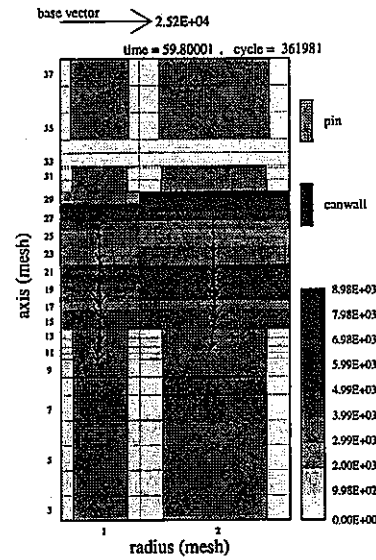


Figure 5. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

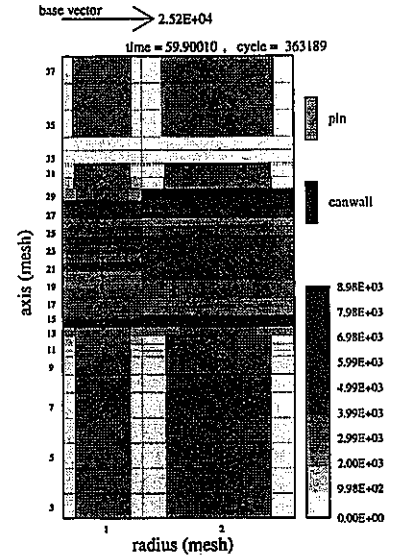


Figure 6. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

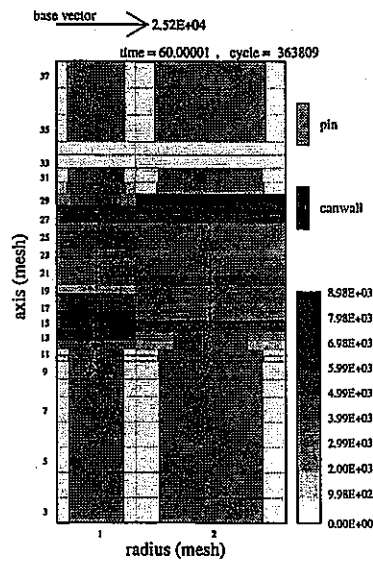


Figure 7. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

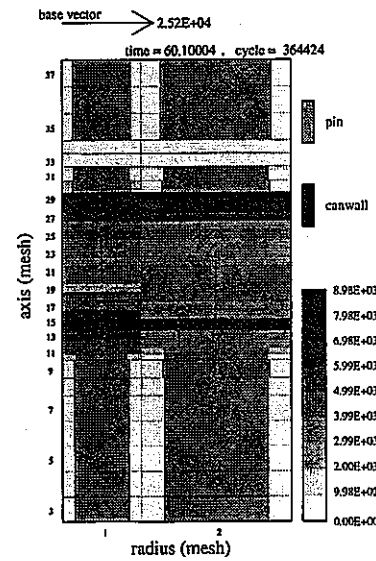


Figure 8. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

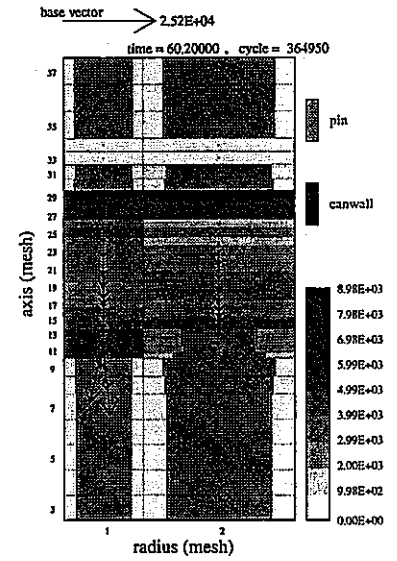


Figure 9. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.2.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (燃料短尺/UAB 有り) (1/4)

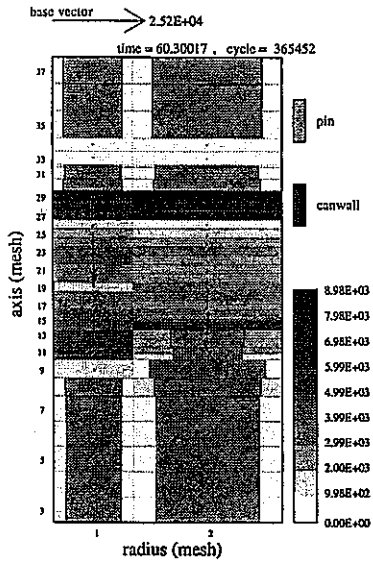


Figure 10. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

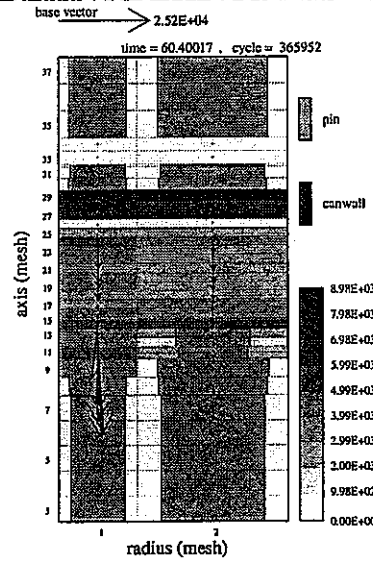


Figure 11. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

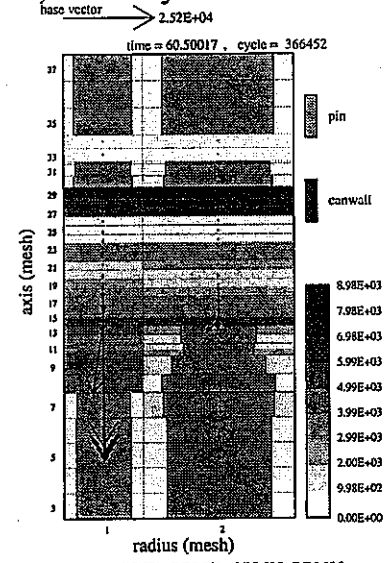


Figure 12. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

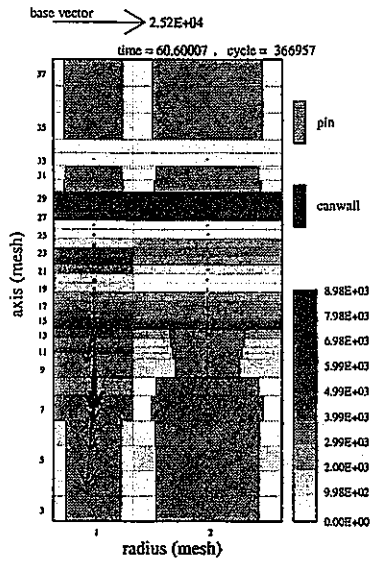


Figure 13. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

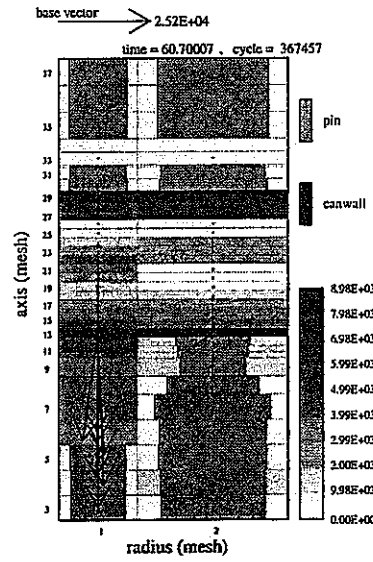


Figure 14. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

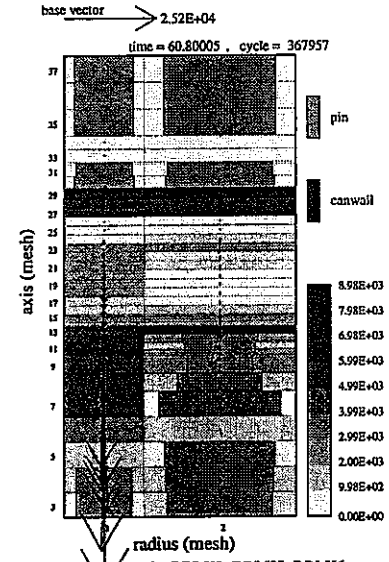


Figure 15. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

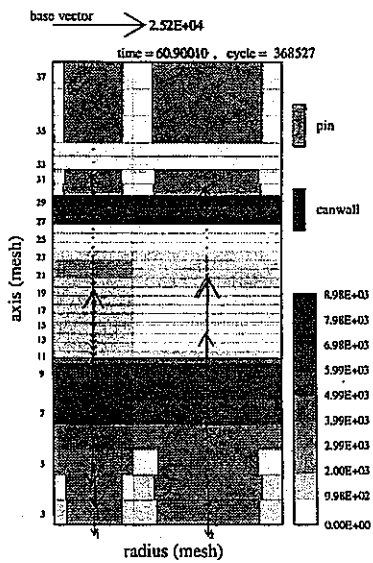


Figure 16. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

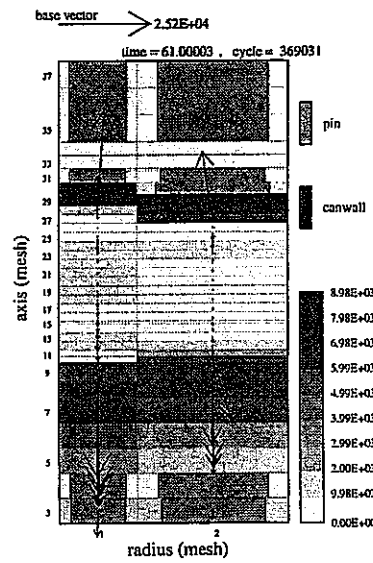


Figure 17. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

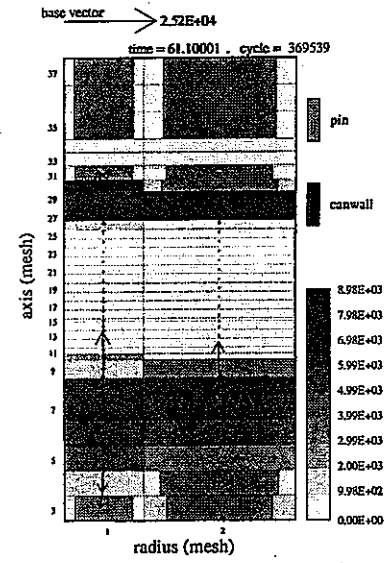


Figure 18. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.2.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (燃料短尺/UAB 有り) (2/4)

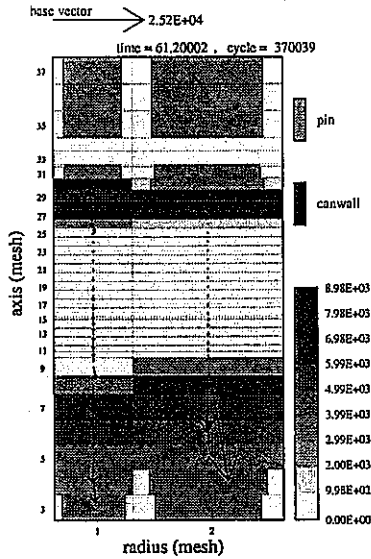


Figure 19. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

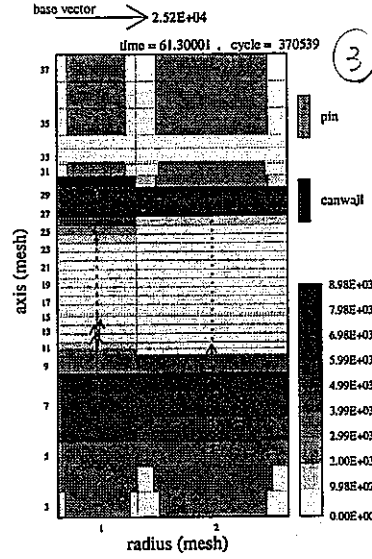


Figure 20. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

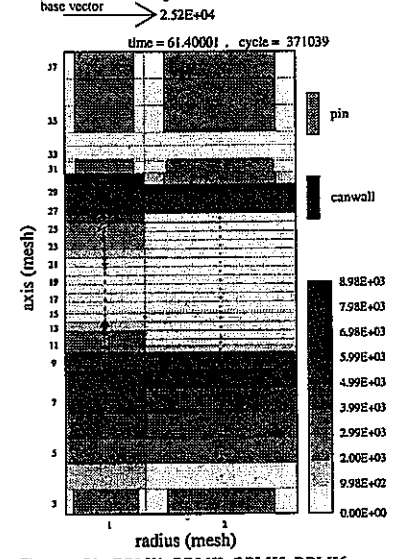


Figure 21. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

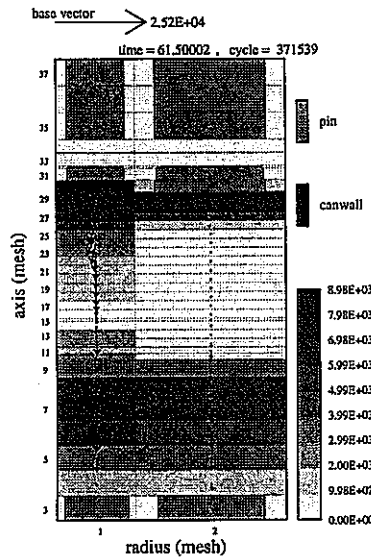


Figure 22. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

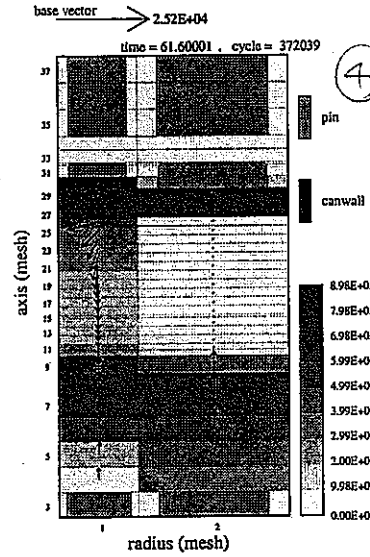


Figure 23. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

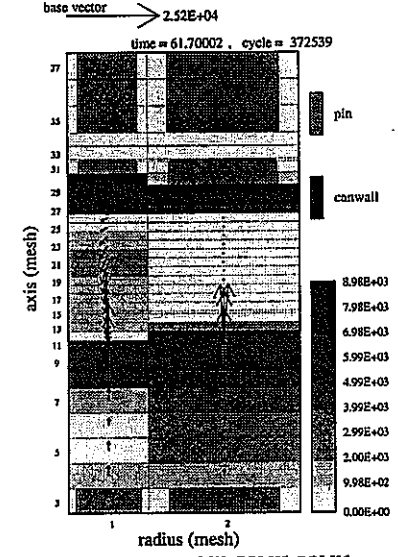


Figure 24. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

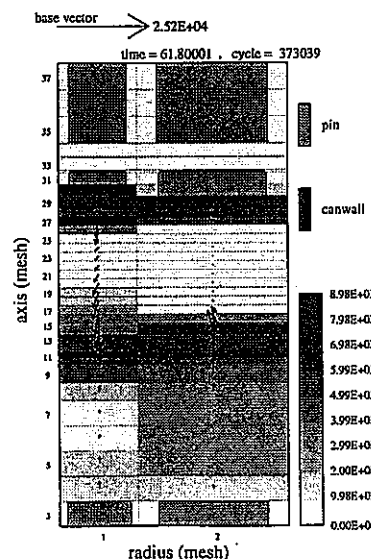


Figure 25. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

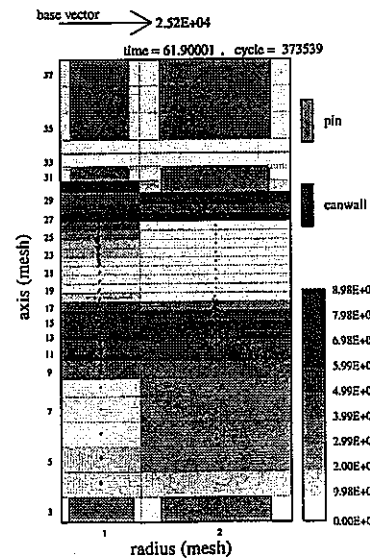


Figure 26. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

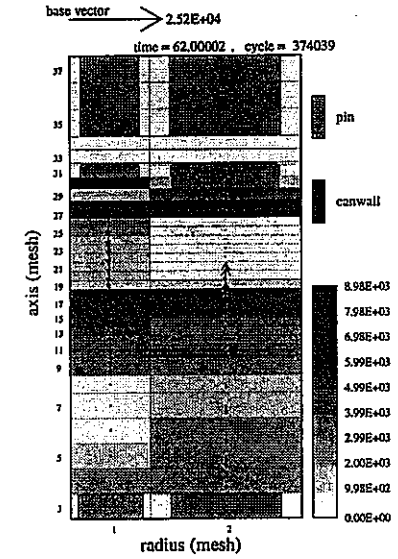


Figure 27. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.2.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (燃料短尺/UAB 有り) (3/4)

Fri Apr 7 19:27:44 2000

sfp.ins.uab.CPVS
 (RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6)*velocity-

1

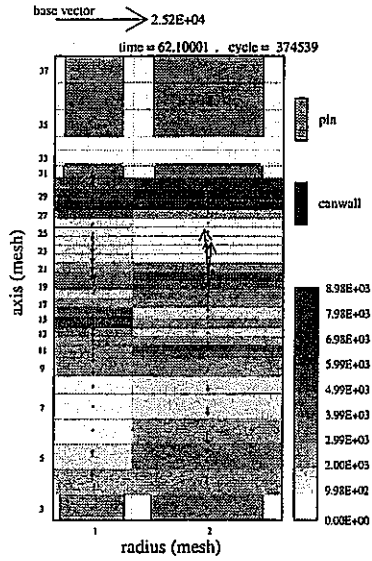


Figure 28. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

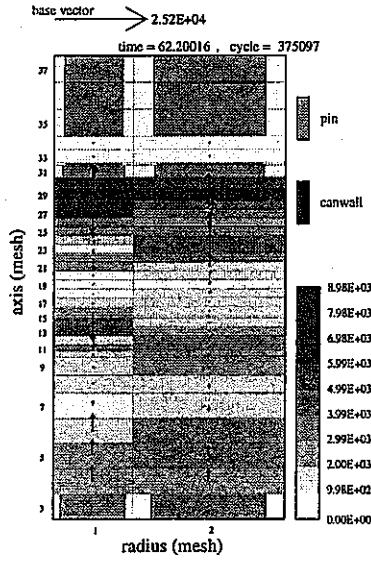


Figure 29. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

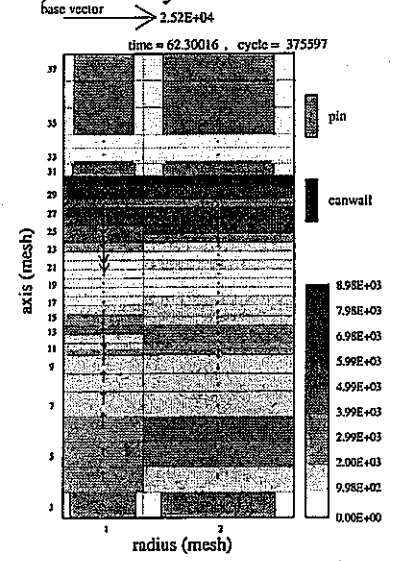


Figure 30. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

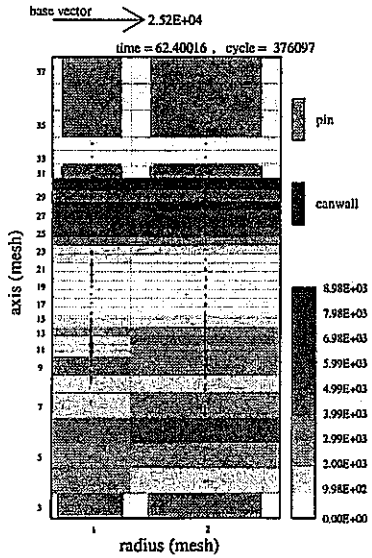


Figure 31. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

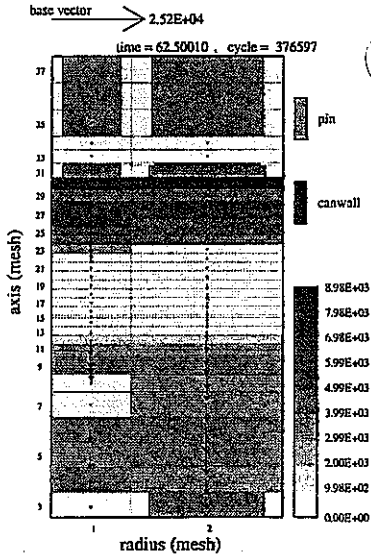


Figure 32. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.2.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (燃料短尺/UAB 有り) (4/4)

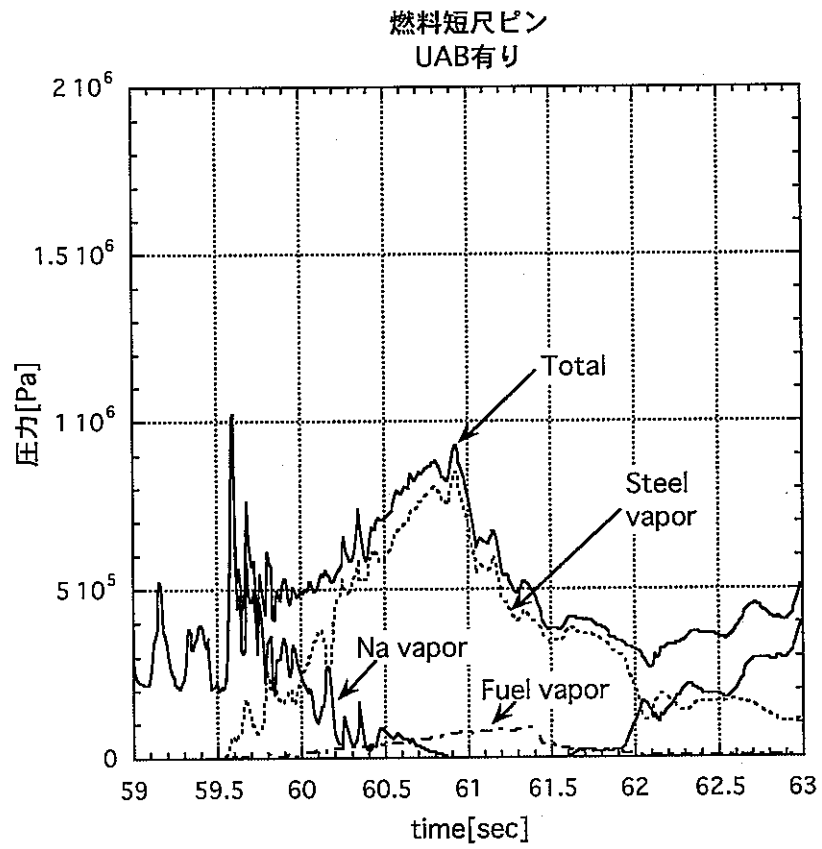


図 4.2.(1)-4 炉心燃料領域の圧力履歴（燃料短尺/UAB 有り）

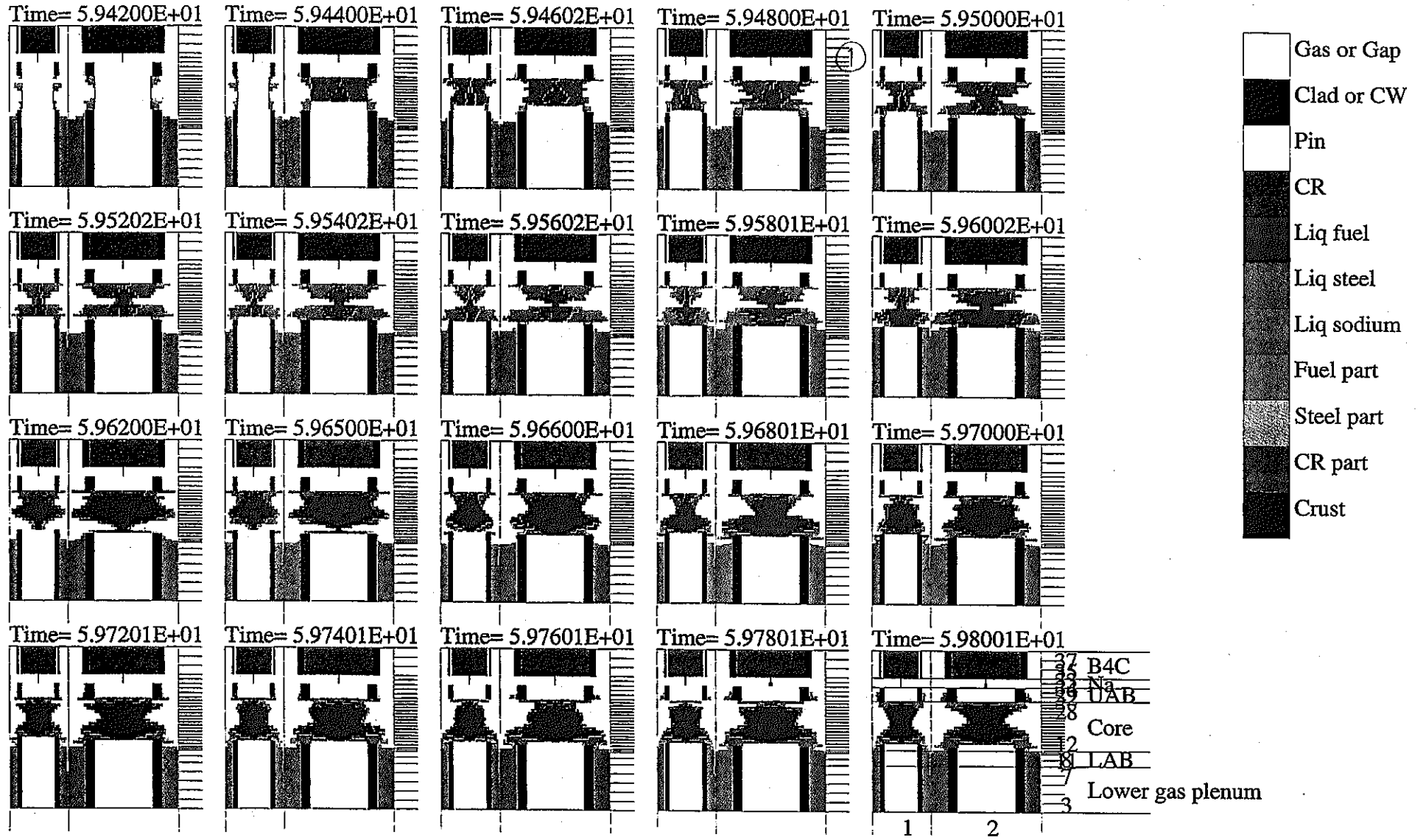
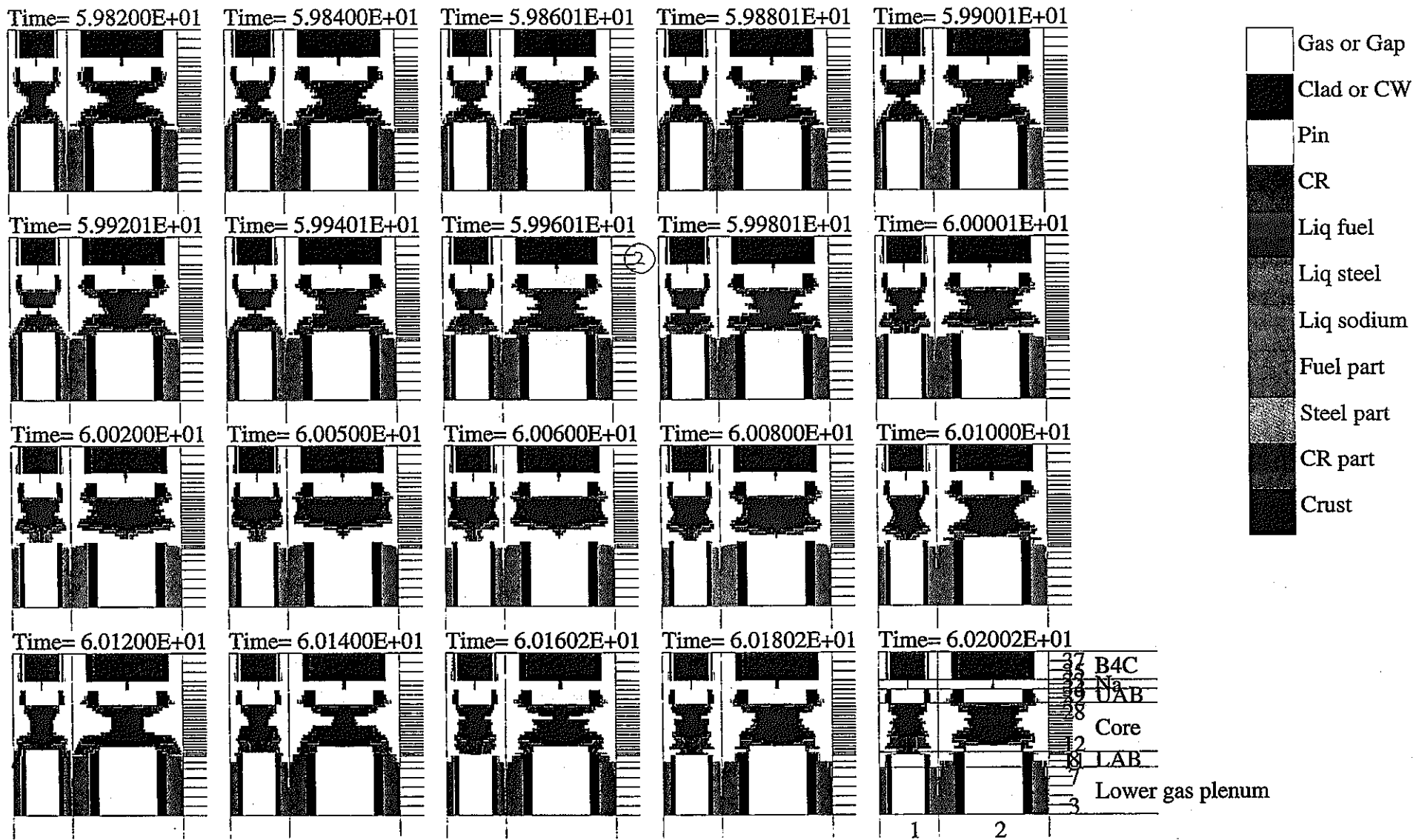
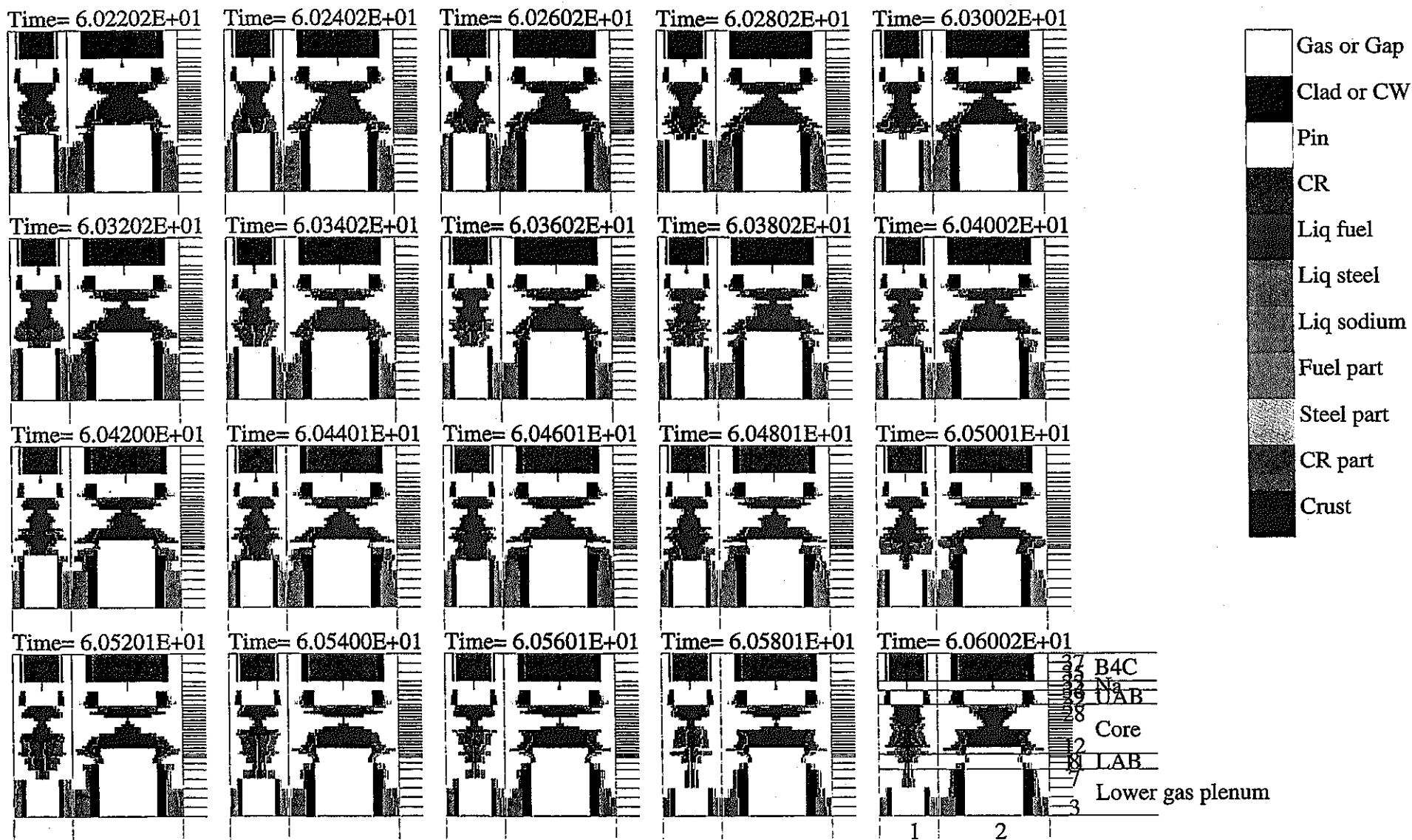


图 4.2.(2)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB無し) (1/5)



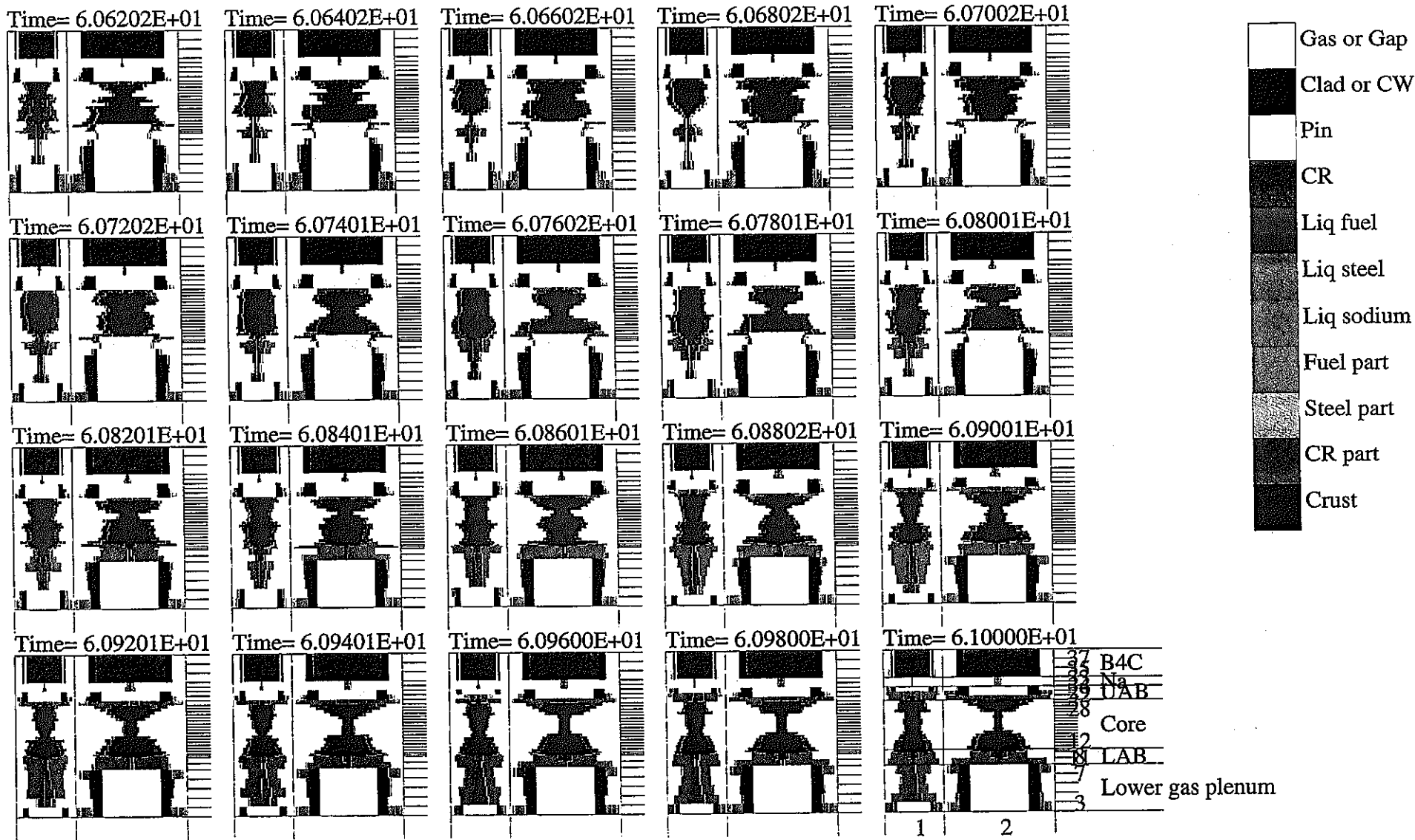
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.2.(2)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 無し) (2/5)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

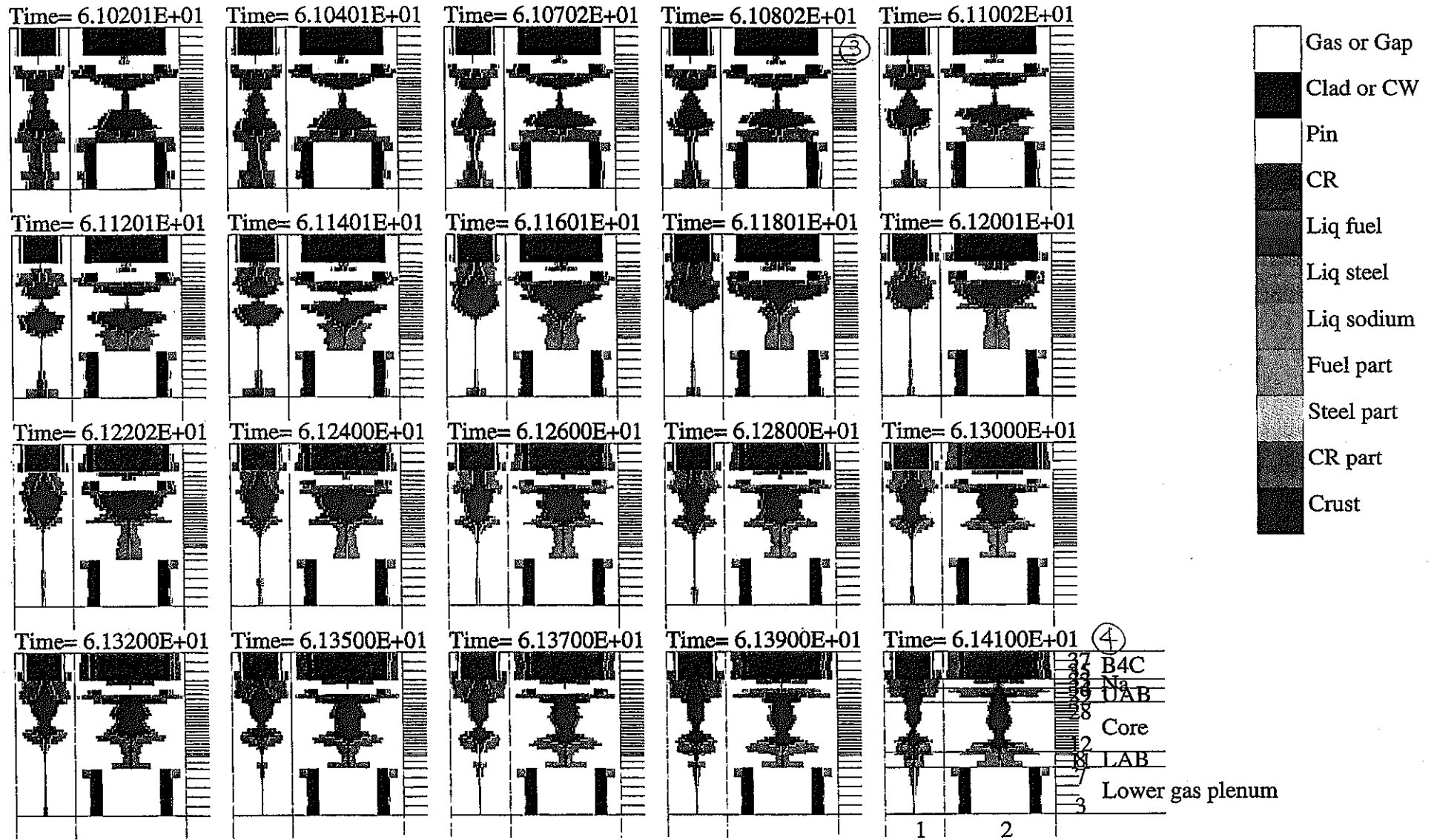
图 4.2.(2)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 無し) (3/5)



-63-

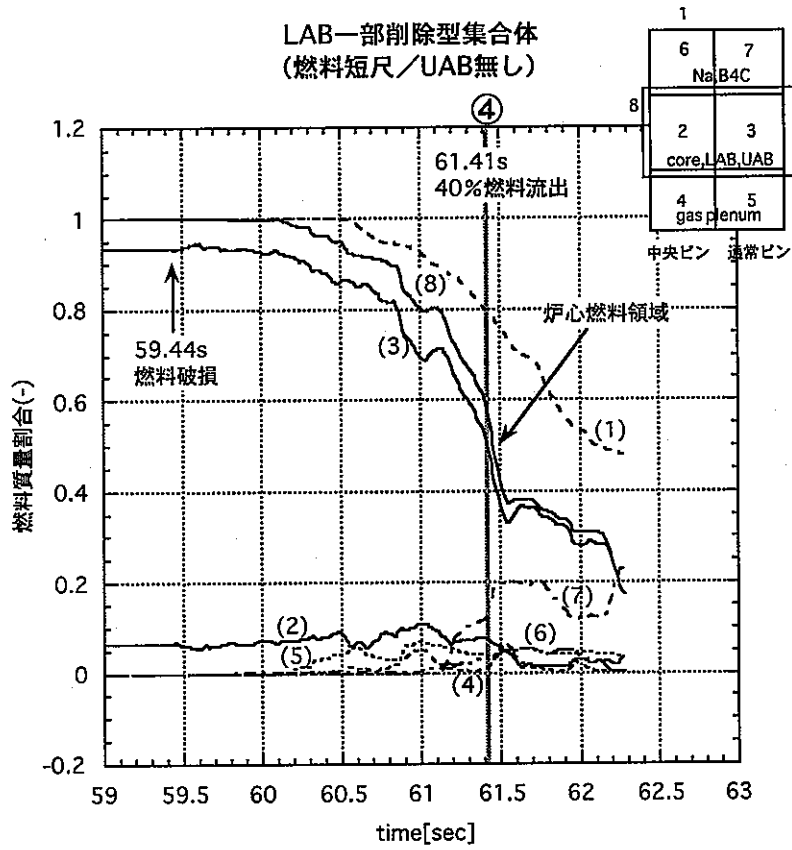
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.2.(2)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB無し) (4/5)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

图 4.2.(2)-1 各成分体積率 (燃料短尺/UAB 無し) (5/5)



40%流出時点の燃料質量分布

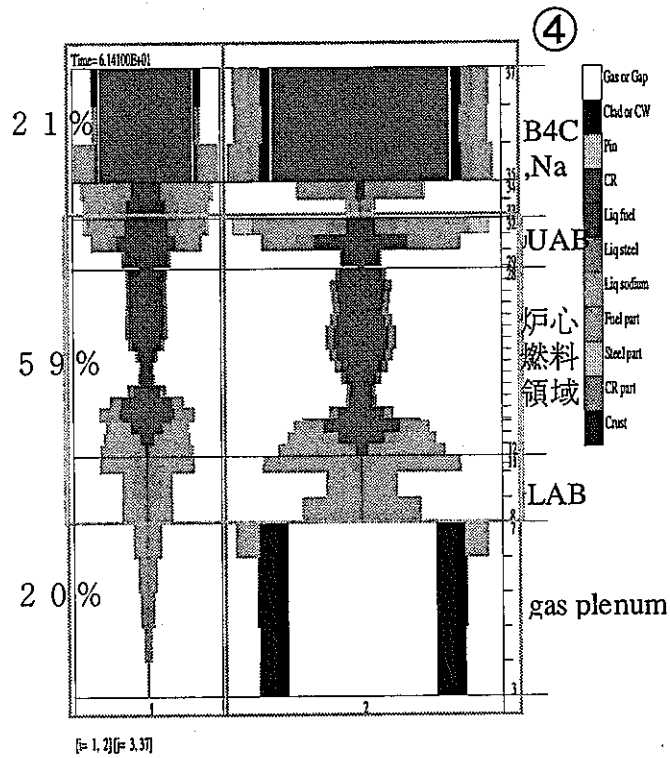


図 4.2.(2)-2 各領域の燃料質量推移 (燃料短尺/UAB 無し)

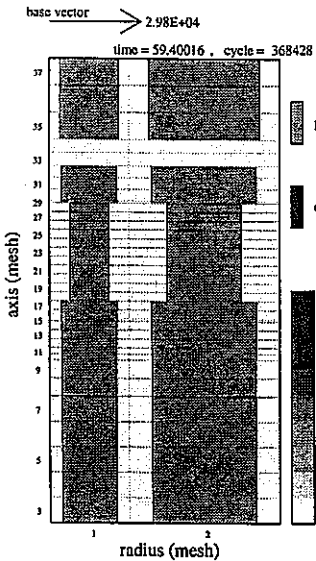


Figure 1. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

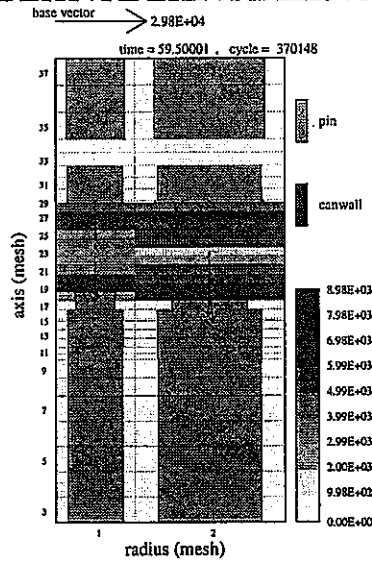


Figure 2. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

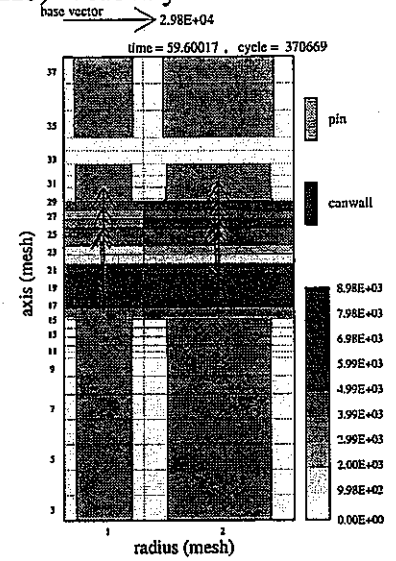


Figure 3. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

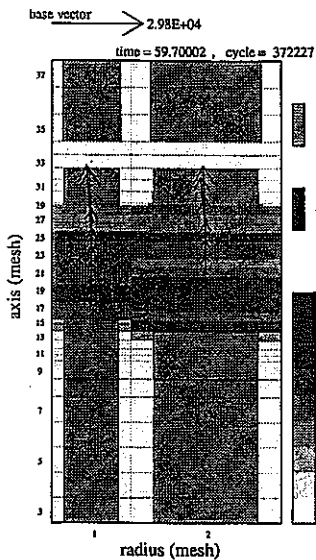


Figure 4. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

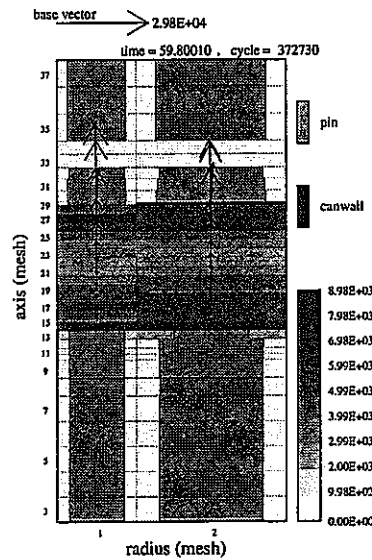


Figure 5. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

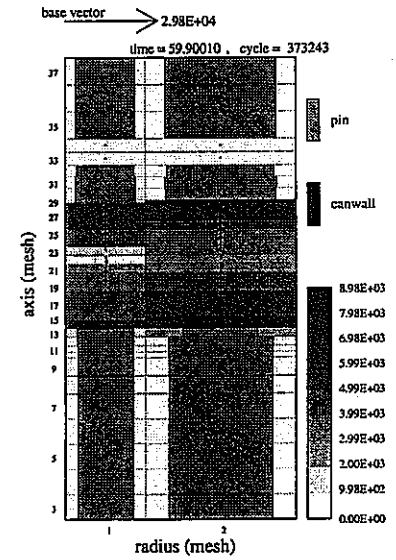


Figure 6. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

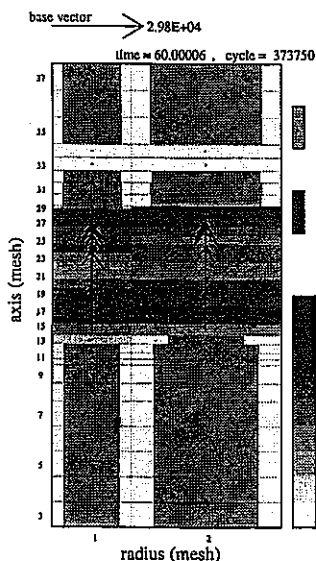


Figure 7. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

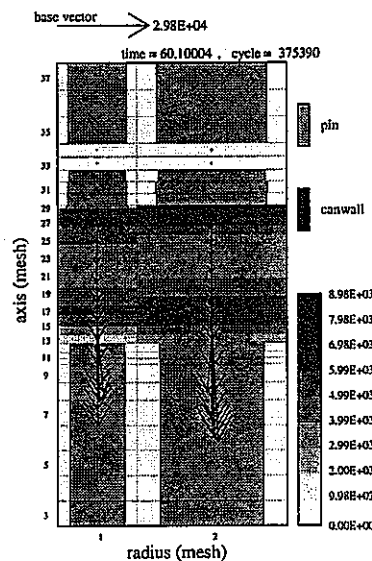


Figure 8. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

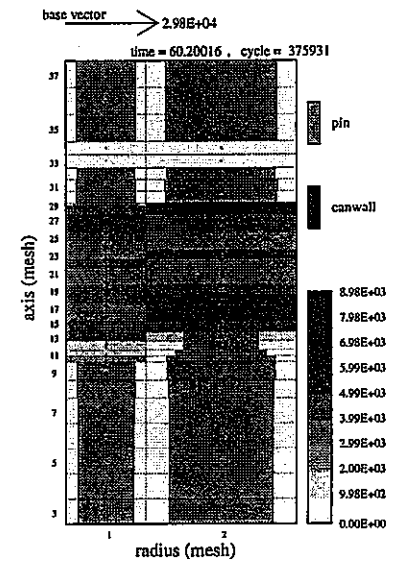


Figure 9. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.2.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (燃料短尺/UAB無し) (1/3)

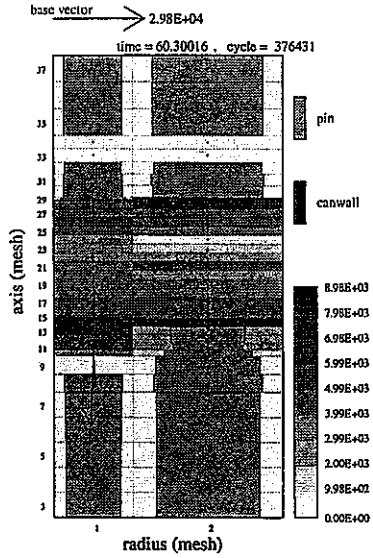


Figure 10. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

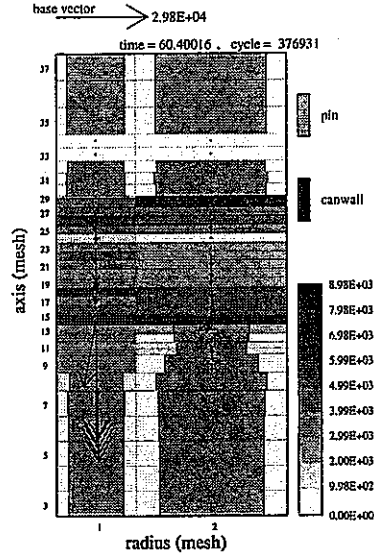


Figure 11. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

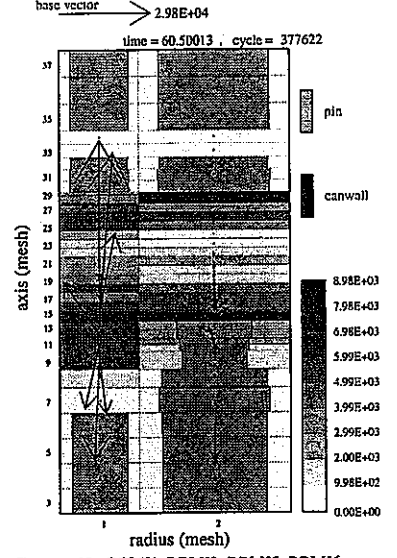


Figure 12. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

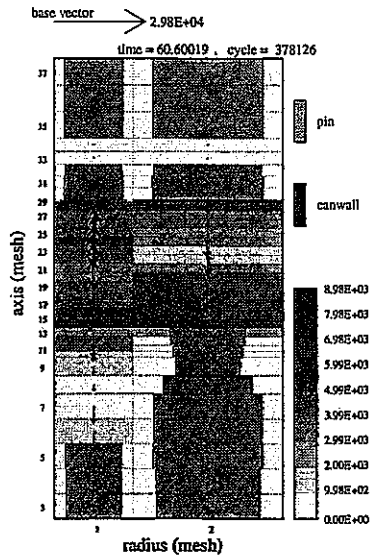


Figure 13. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

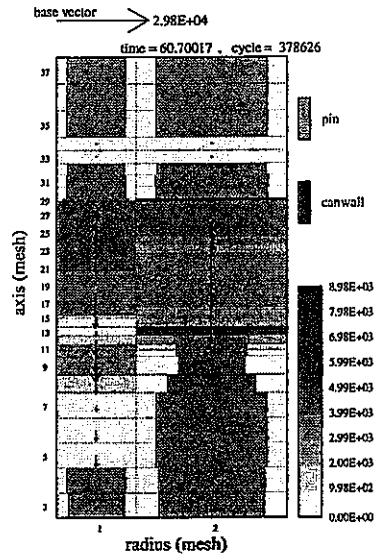


Figure 14. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

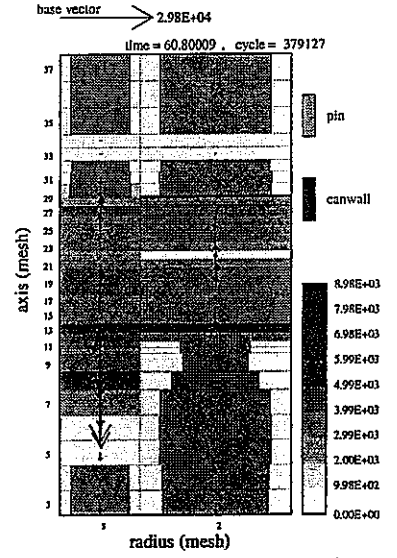


Figure 15. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

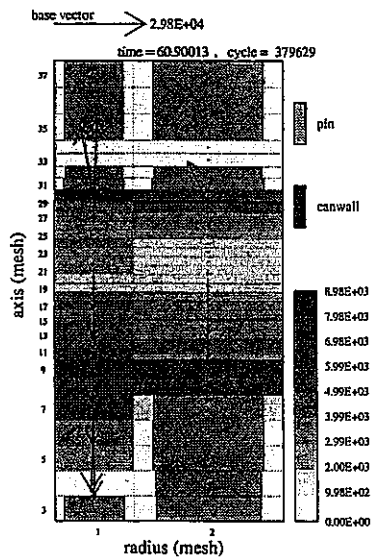


Figure 16. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

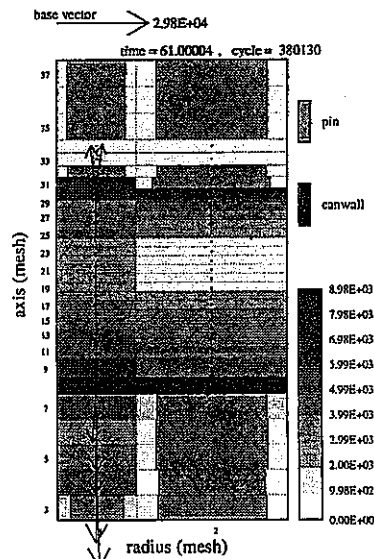


Figure 17. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

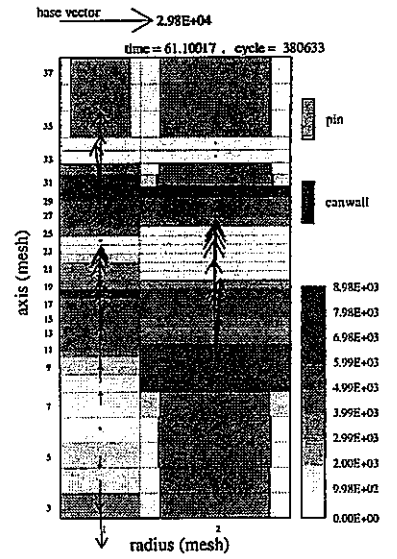


Figure 18. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.2.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (燃料短尺/UAB 無し) (2/3)

Fri Apr 7 19:38:54 2000

sfp.ins.CPVS

(RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6)*velocity-

1

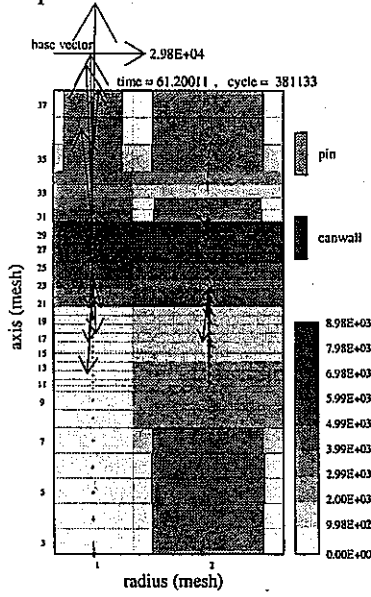


Figure 19. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

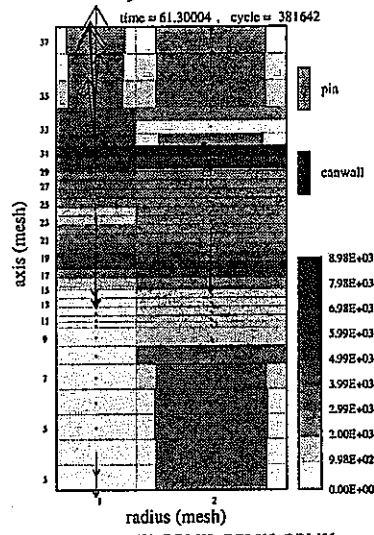


Figure 20. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

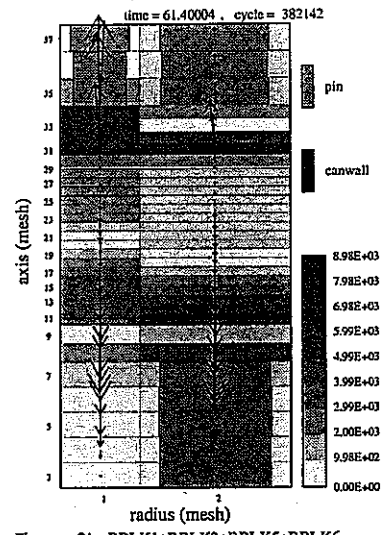


Figure 21. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

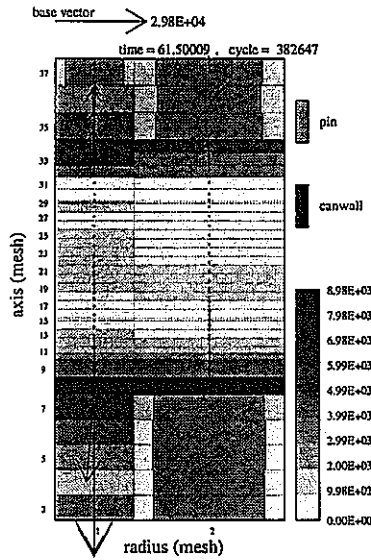


Figure 22. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.2.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (燃料短尺/UAB無し) (3/3)

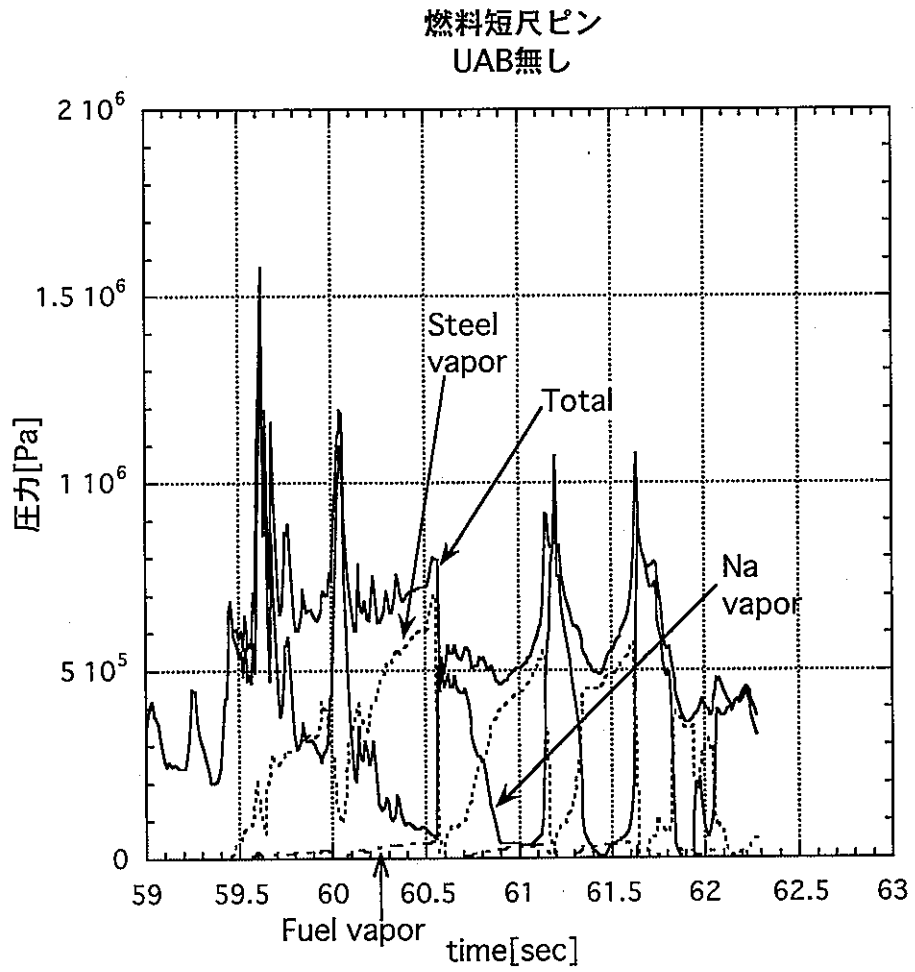


図 4.2.(2)-4 炉心燃料領域の圧力履歴 (燃料短尺/UAB無し)

LAB一部削除型集合体 (燃料短尺)
UAB有無の影響

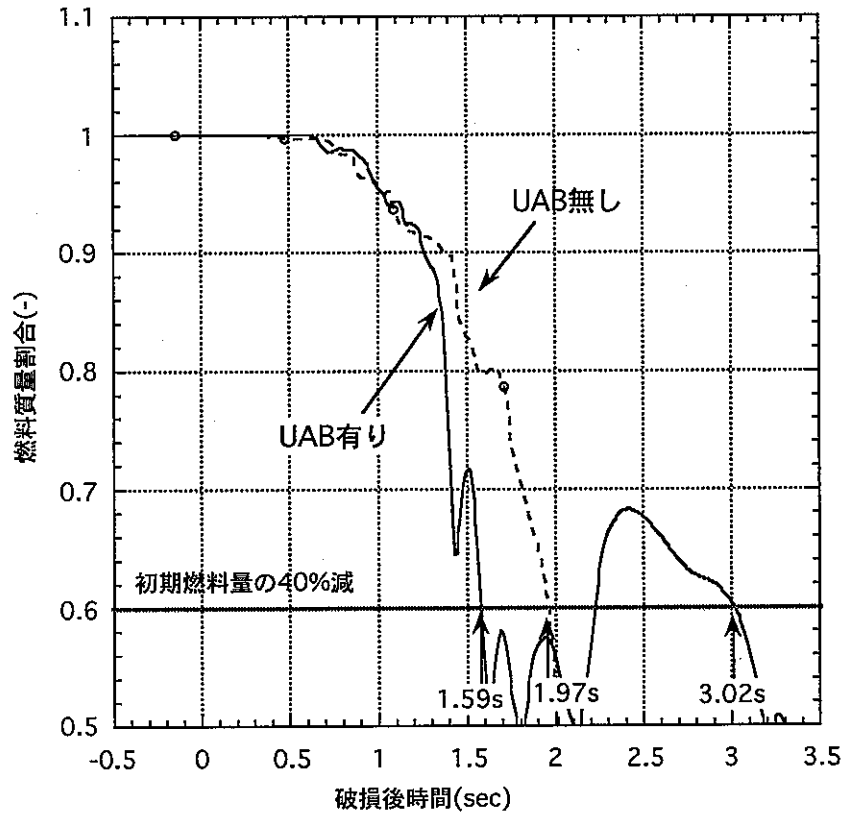
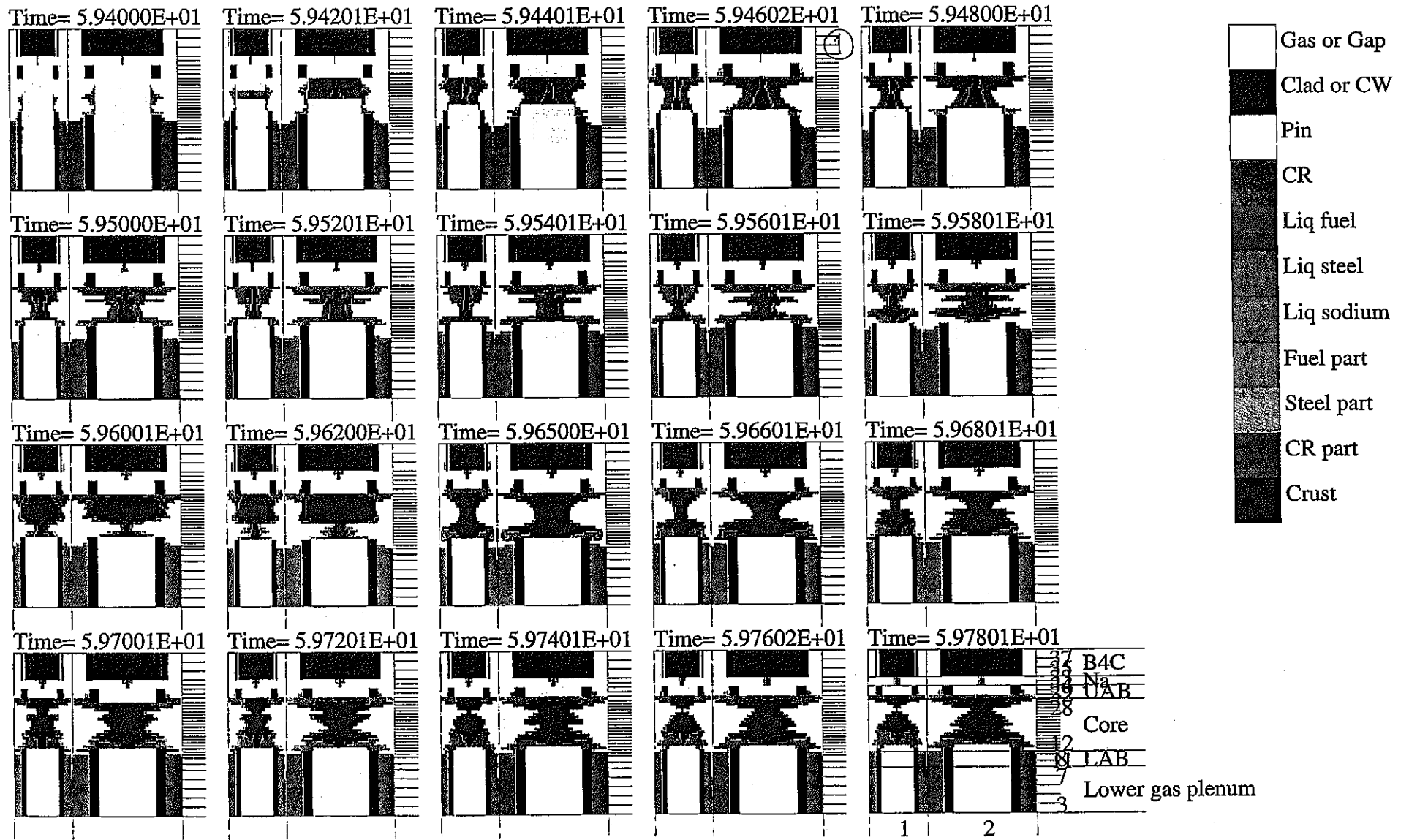
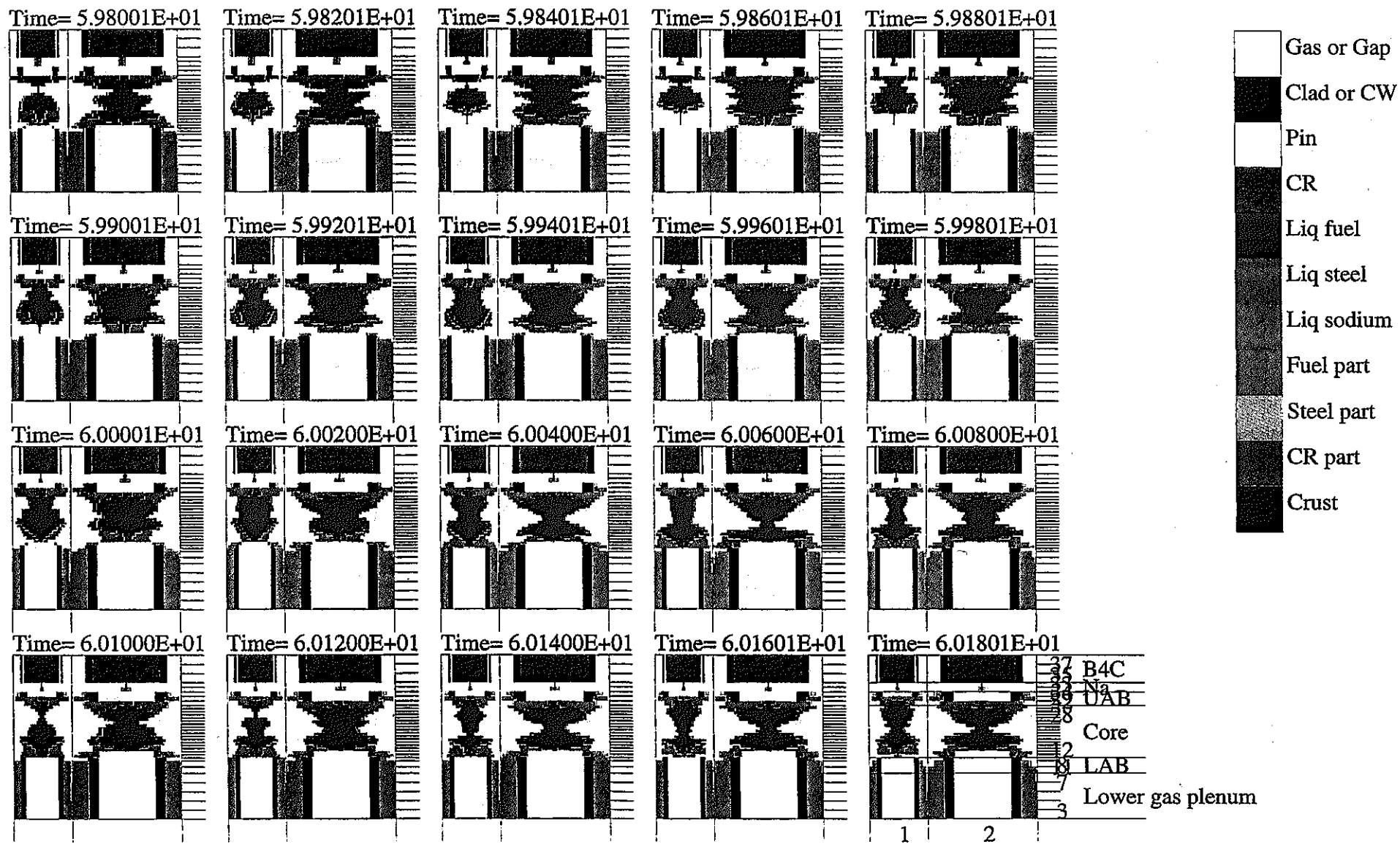


図 4.2.(2)-5 UAB 有無の比較



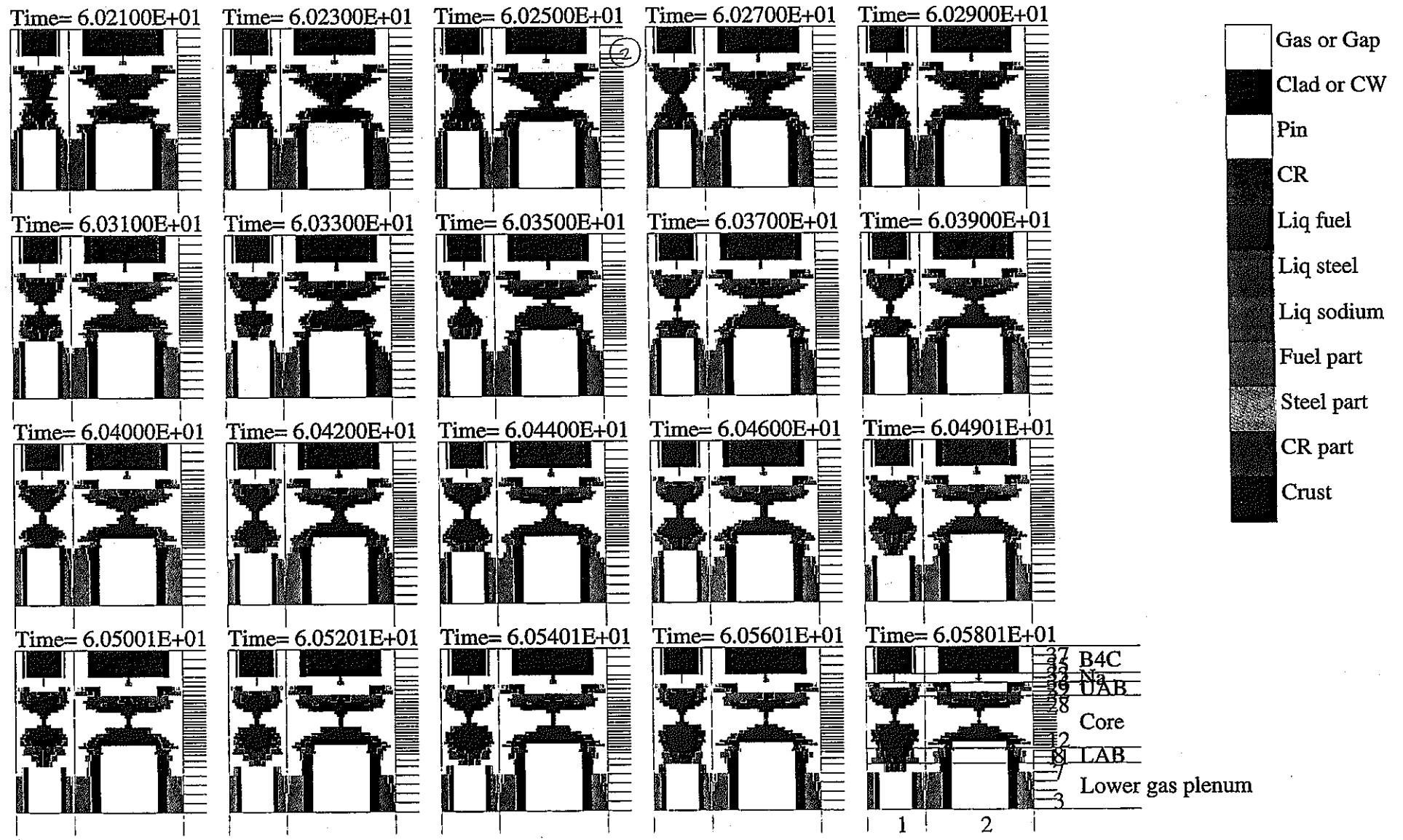
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LABのみ削除/UAB有り) (1/10)



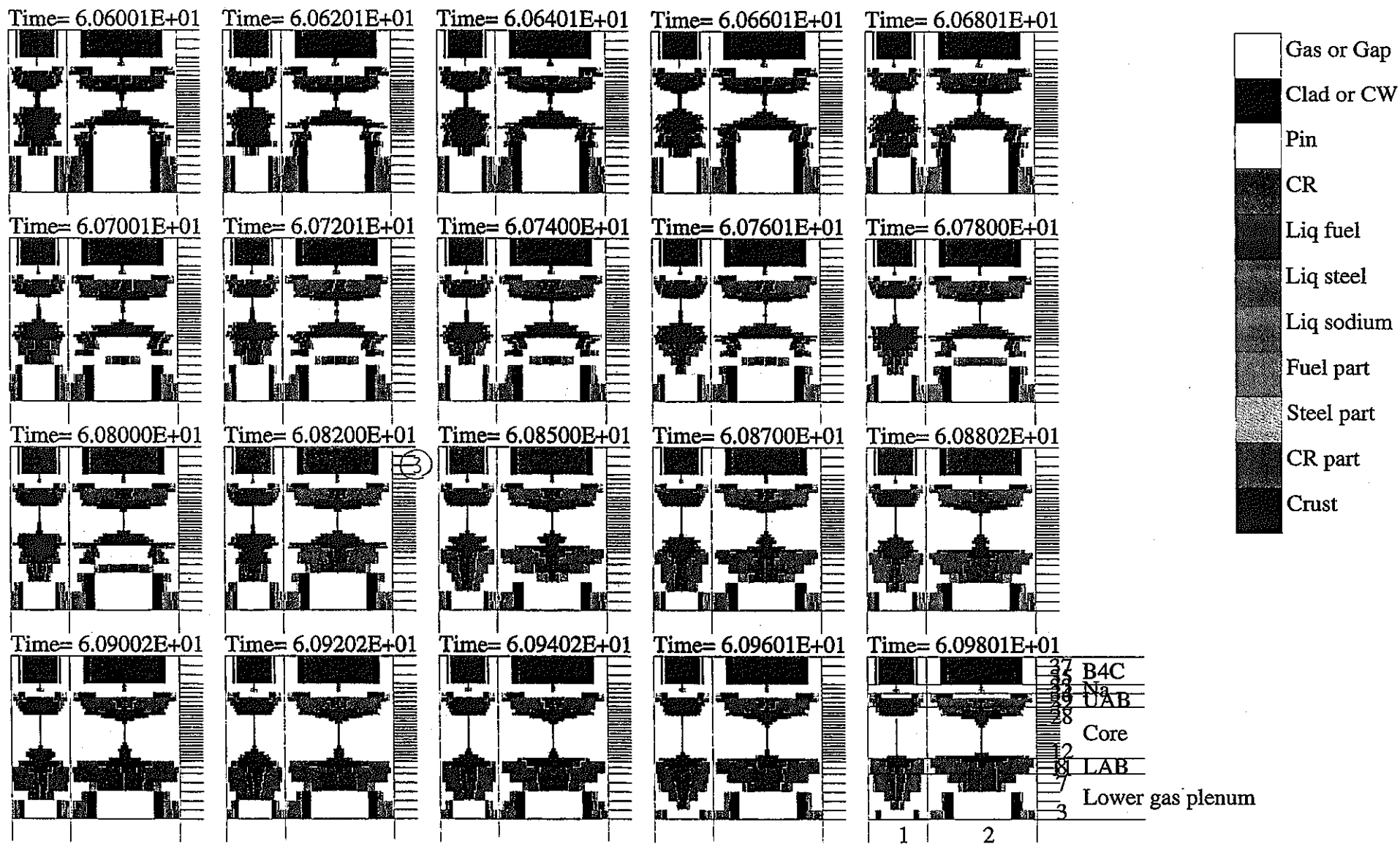
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 有り) (2/10)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

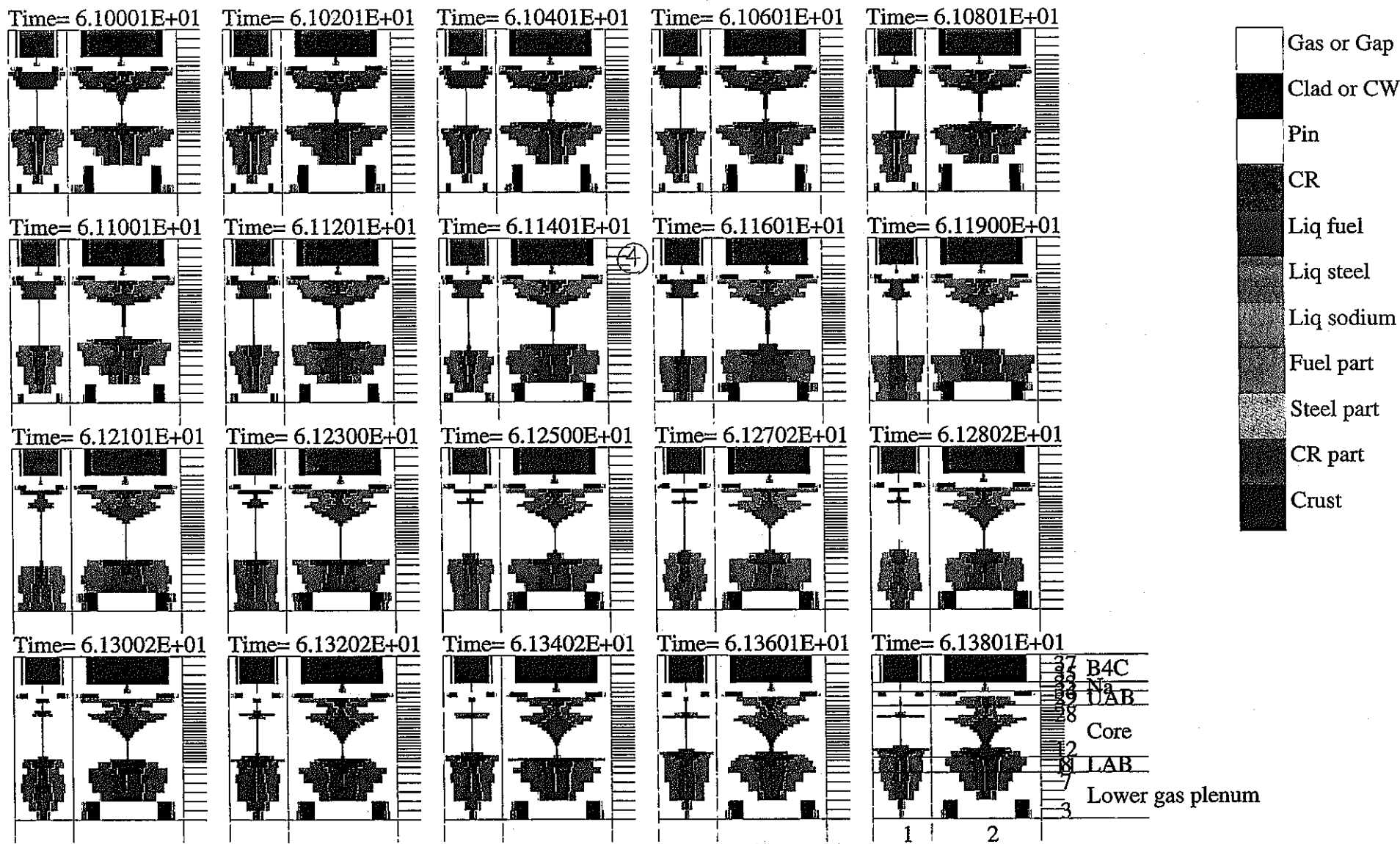
図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 有り) (3/10)



-74-

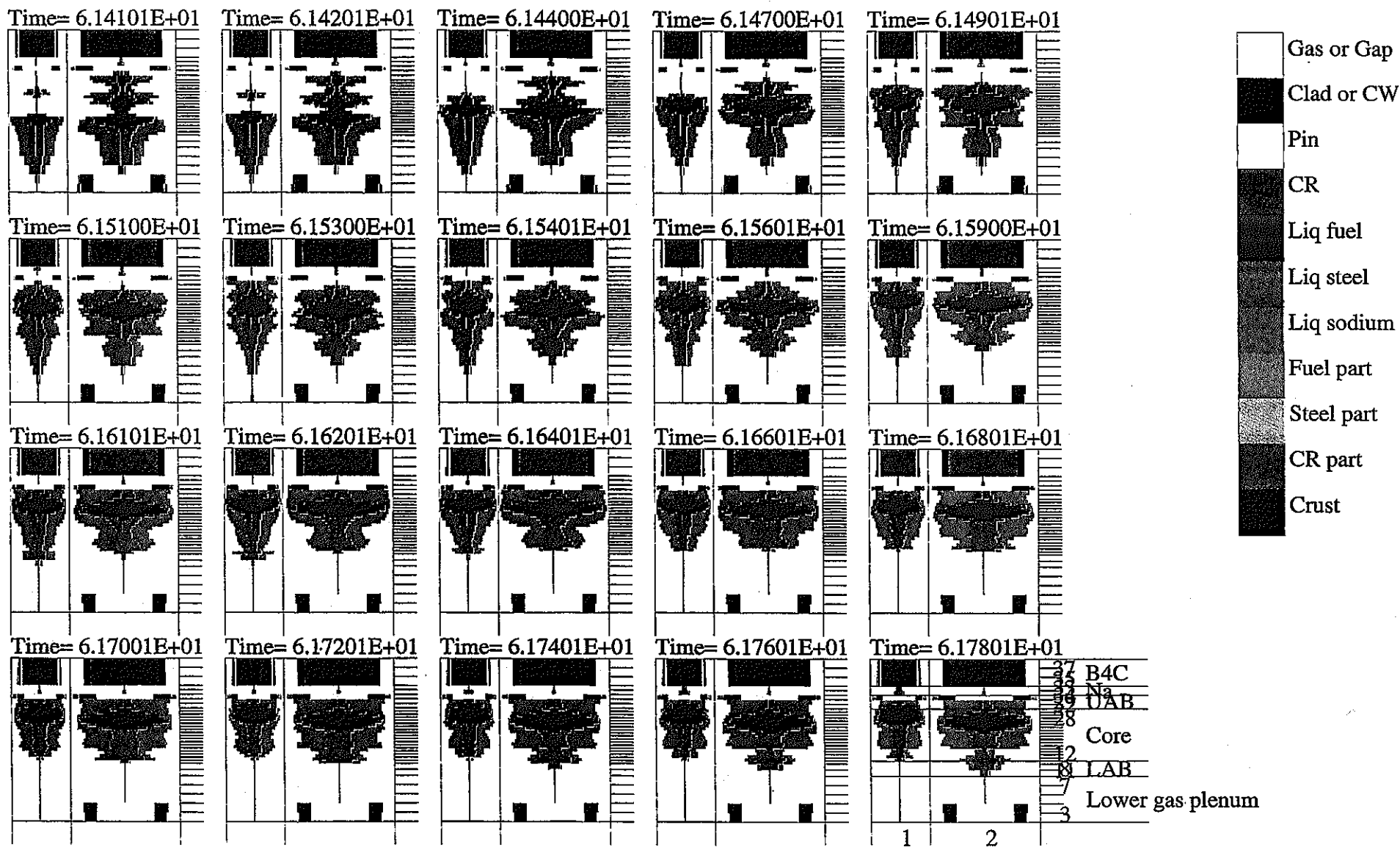
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 有り) (4/10)



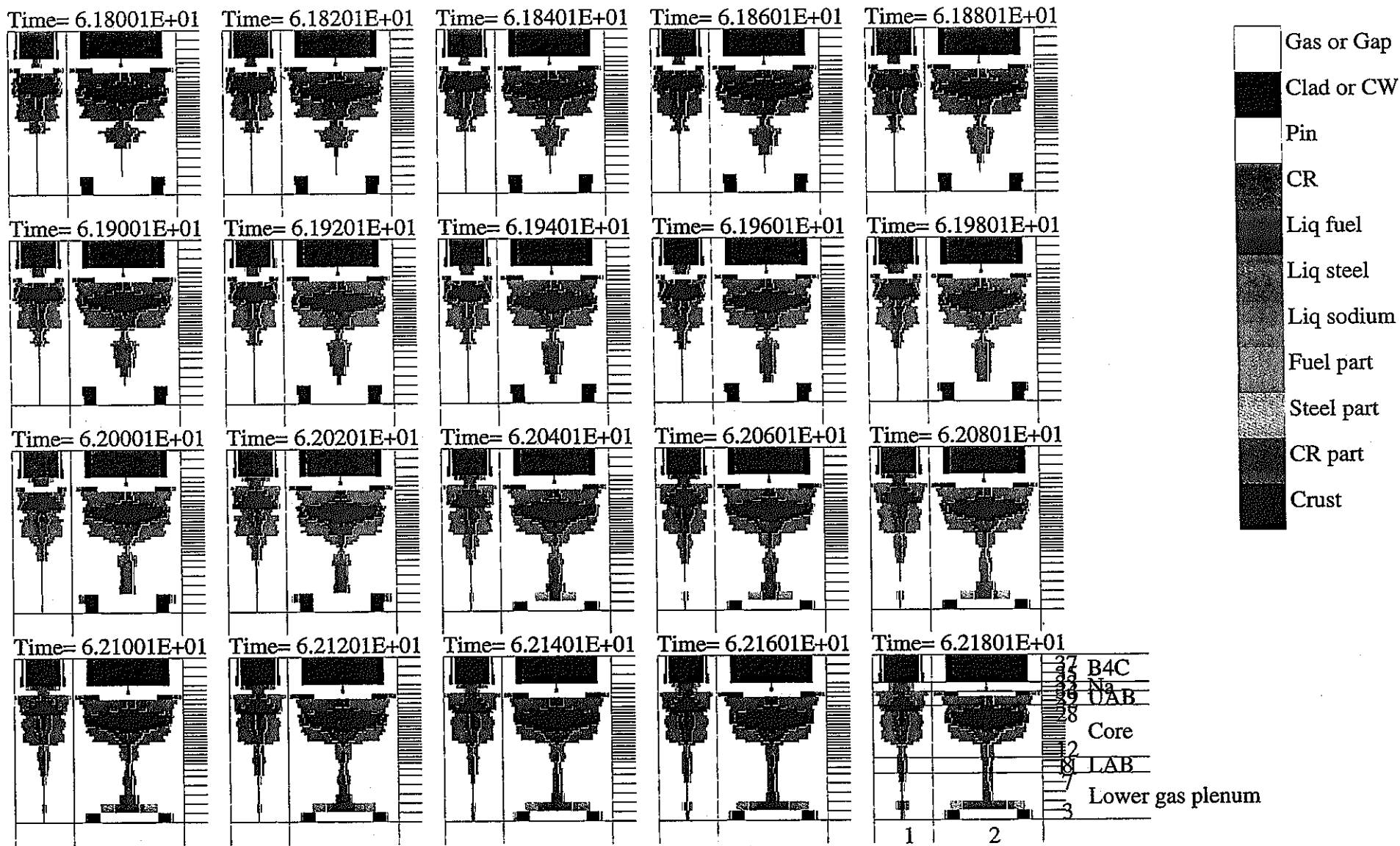
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LABのみ削除/UAB有り) (5/10)



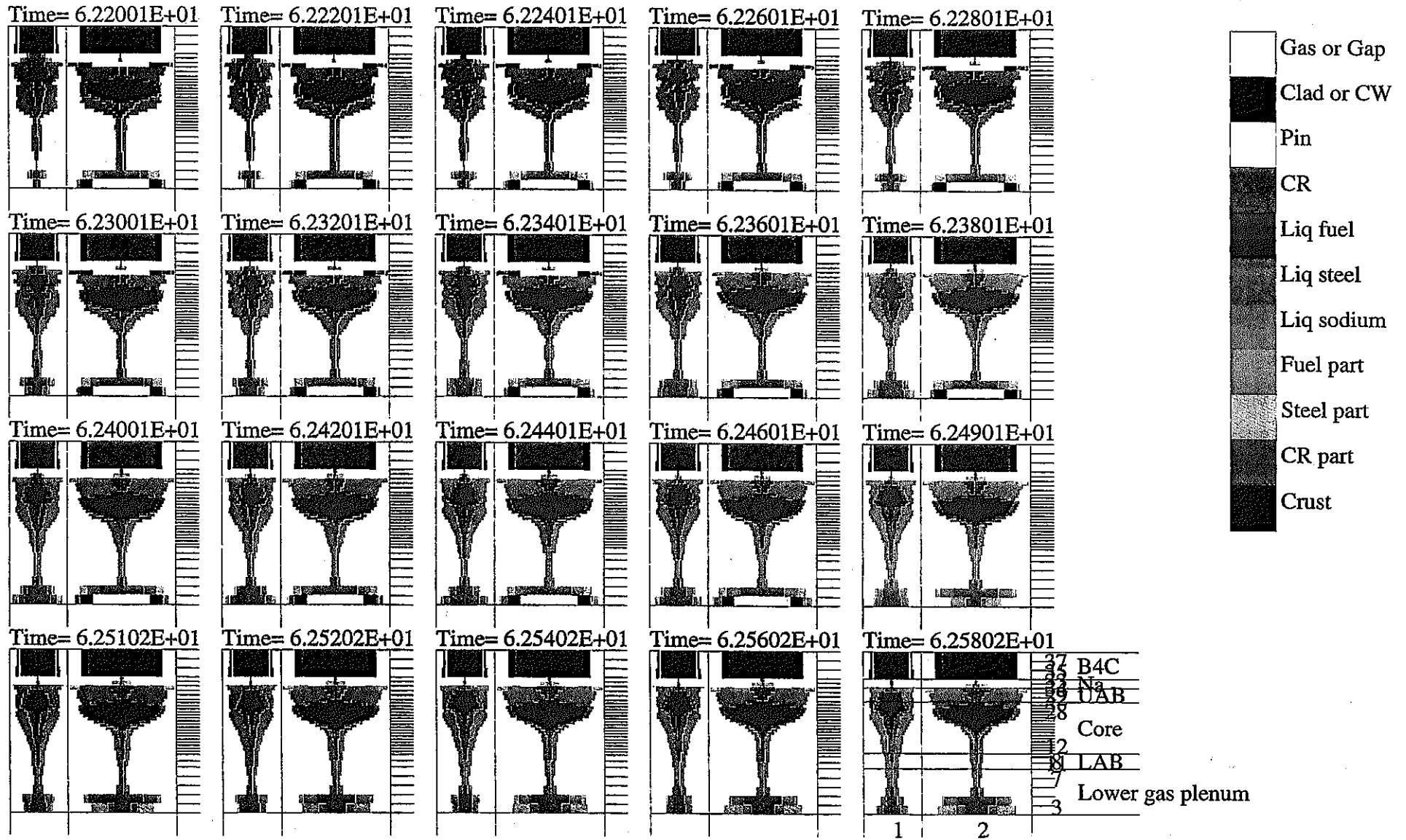
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 有り) (6/10)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

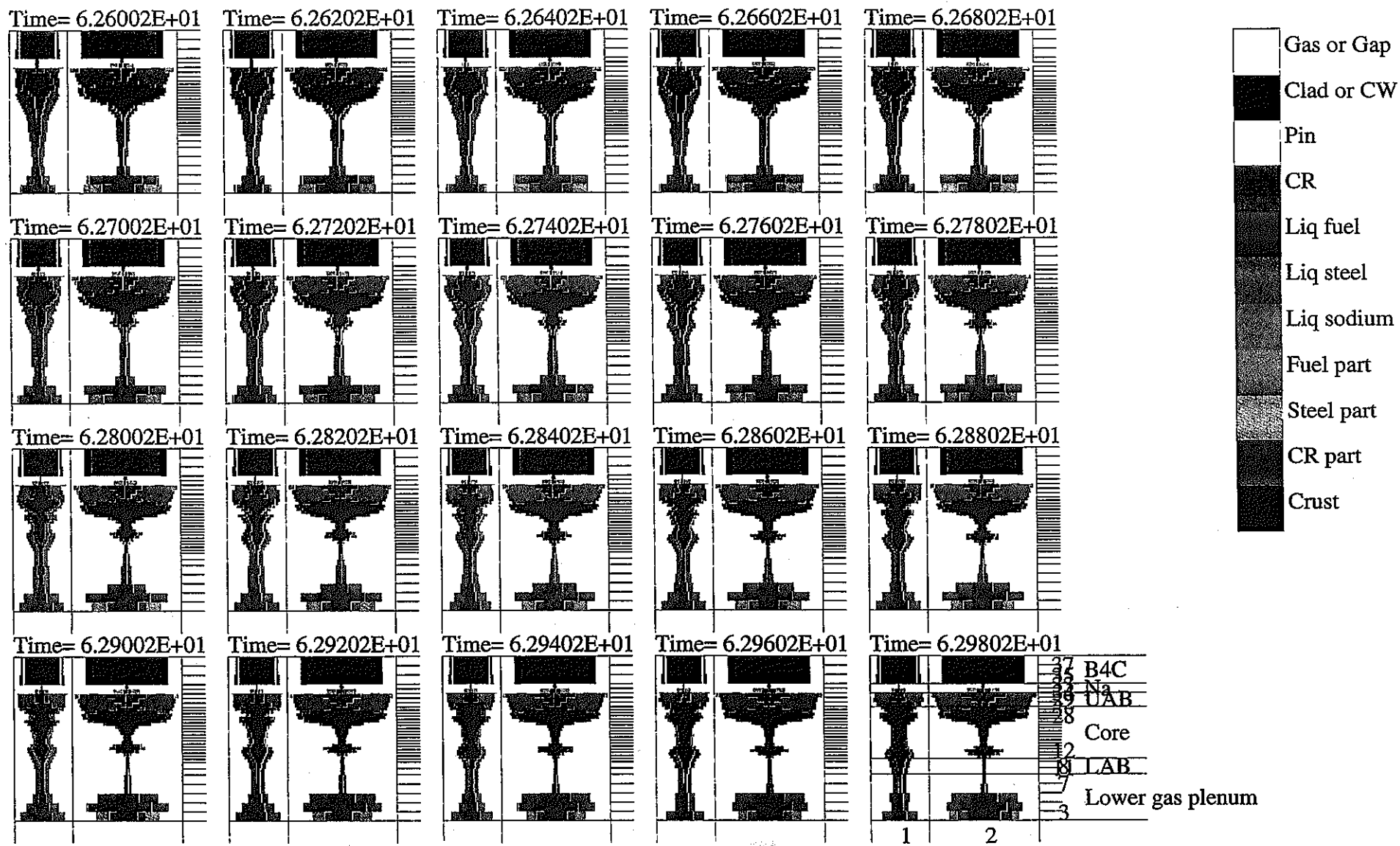
図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 有り) (7/10)



-78-

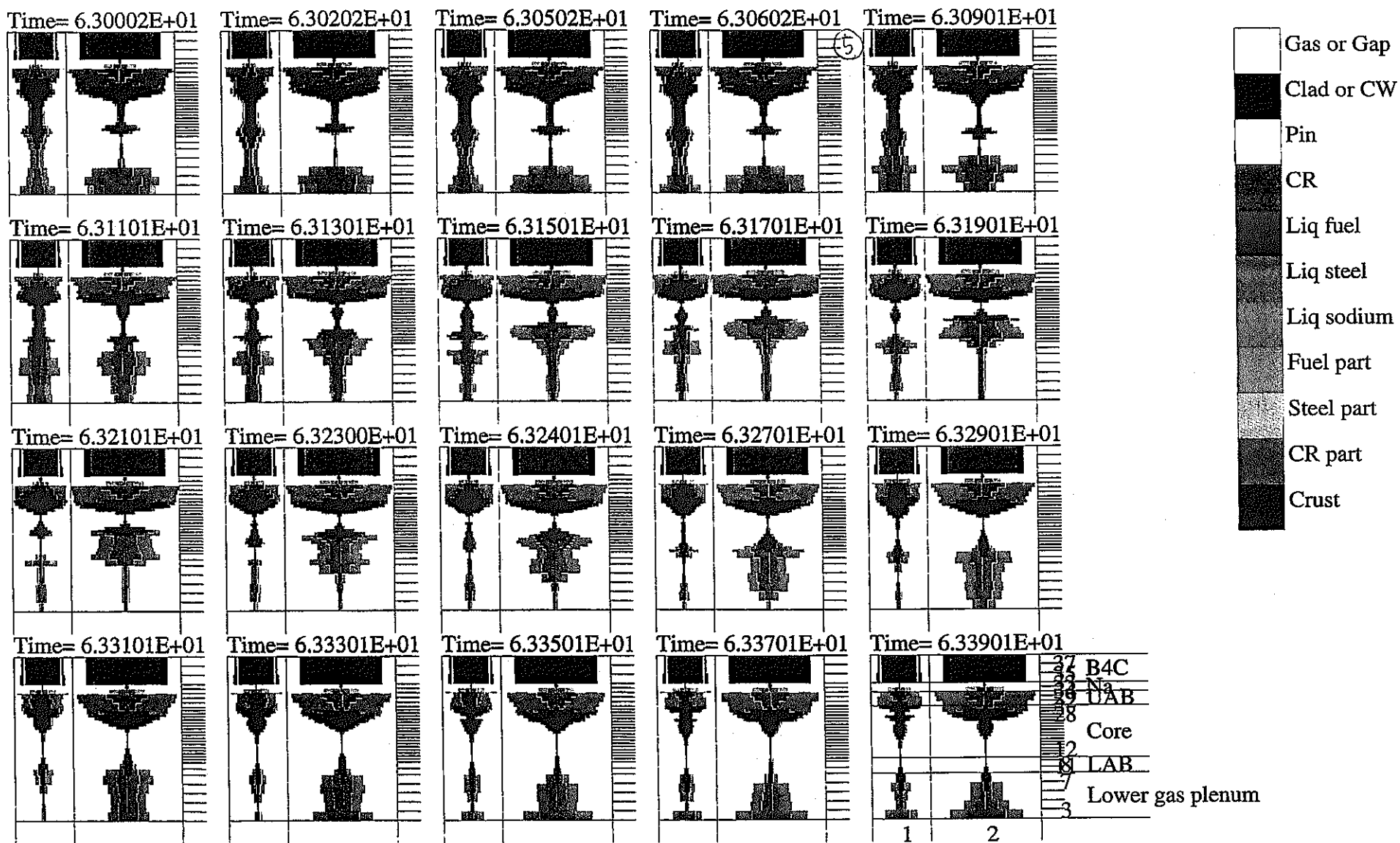
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 有り) (8/10)



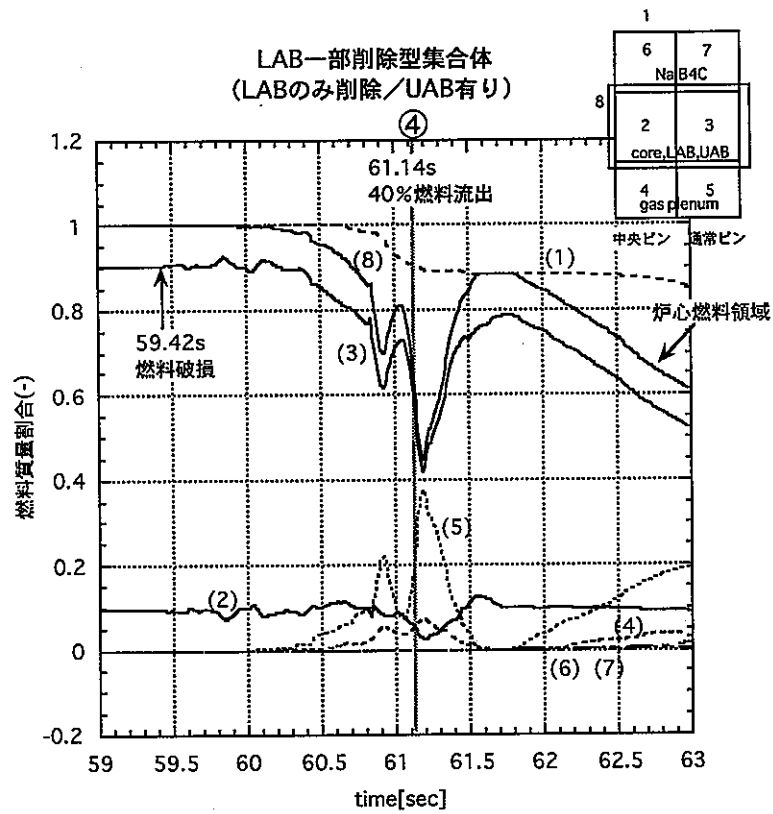
[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LABのみ削除/UAB有り) (9/10)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(1)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 有り) (10/10)



40%流出時点の燃料質量分布

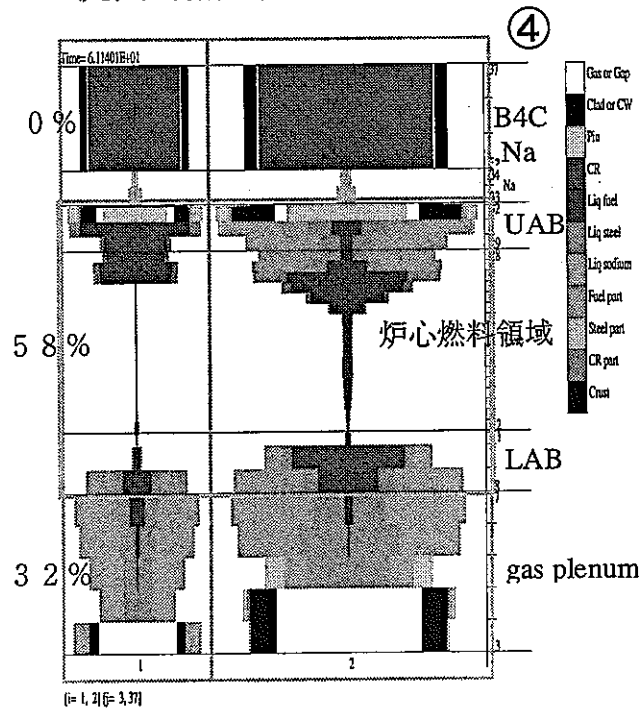


図 4.3.(1)-2 各領域の燃料質量推移 (LAB のみ削除/UAB 有り)

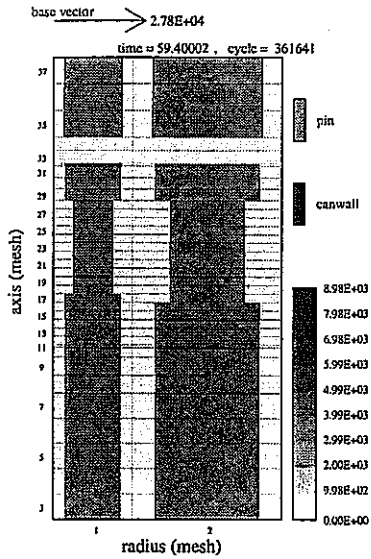


Figure 1. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

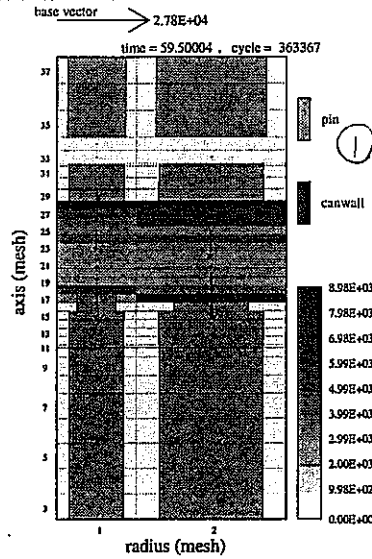


Figure 2. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

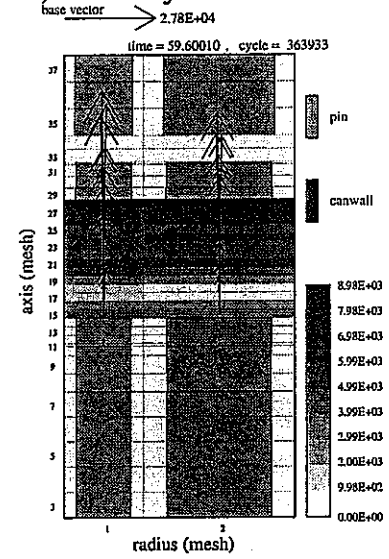


Figure 3. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

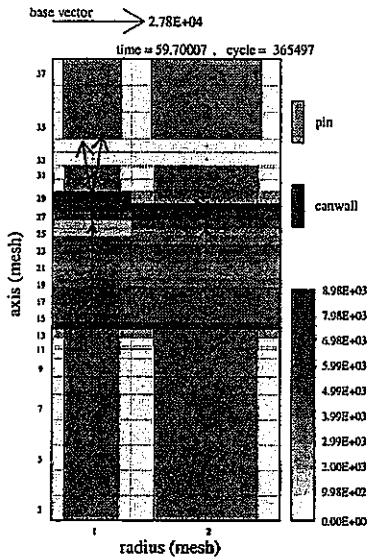


Figure 4. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

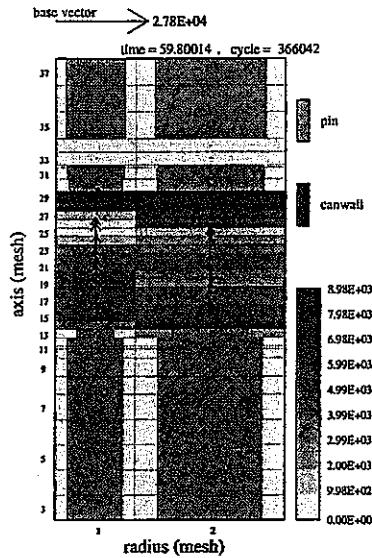


Figure 5. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

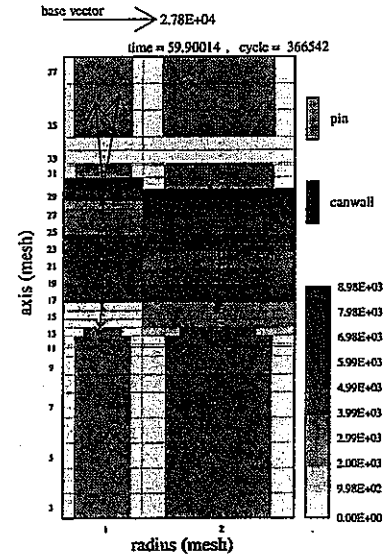


Figure 6. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

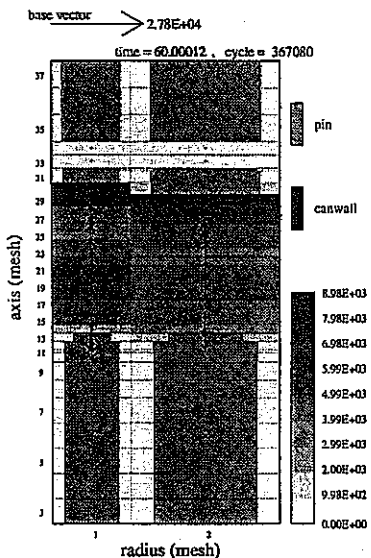


Figure 7. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

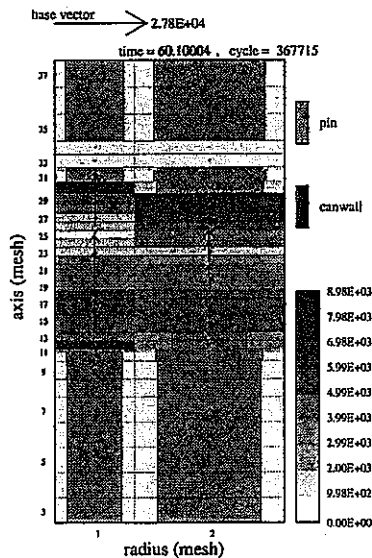


Figure 8. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

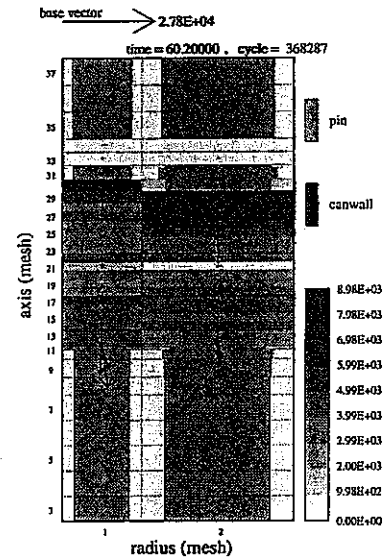


Figure 9. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.3.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量(LABのみ削除/UAB有り) (1/5)

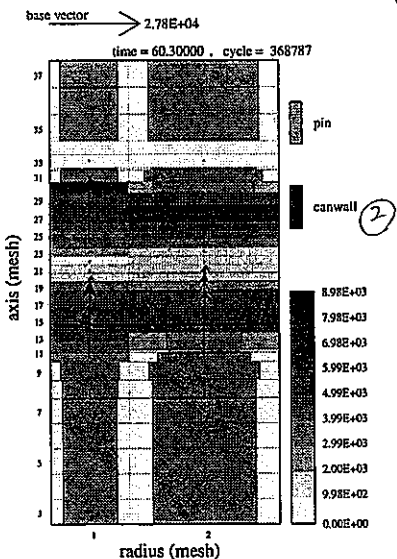


Figure 10. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

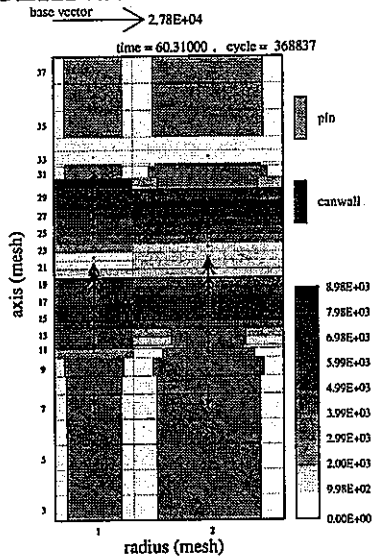


Figure 11. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

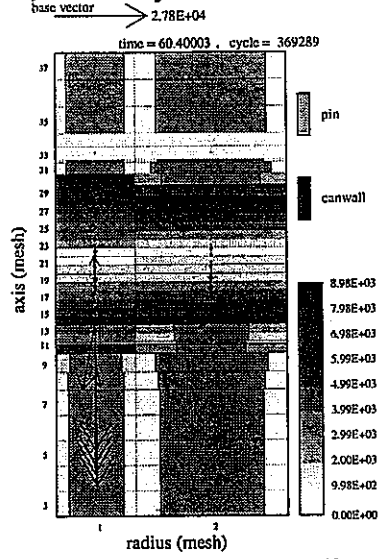


Figure 12. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

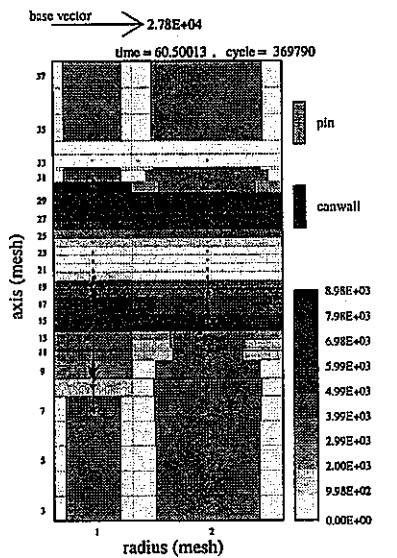


Figure 13. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

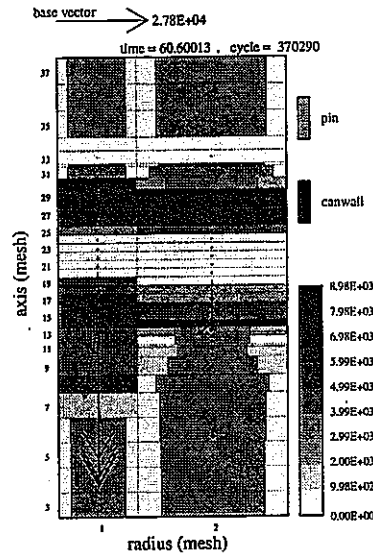


Figure 14. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

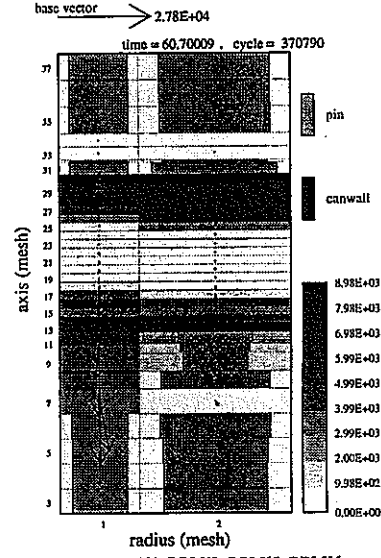


Figure 15. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

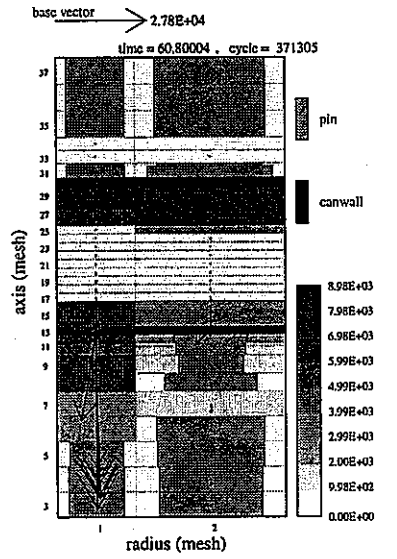


Figure 16. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

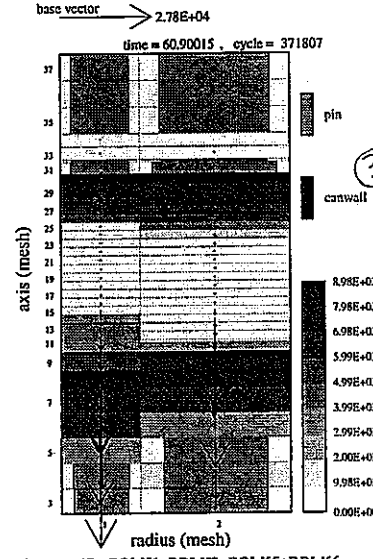


Figure 17. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

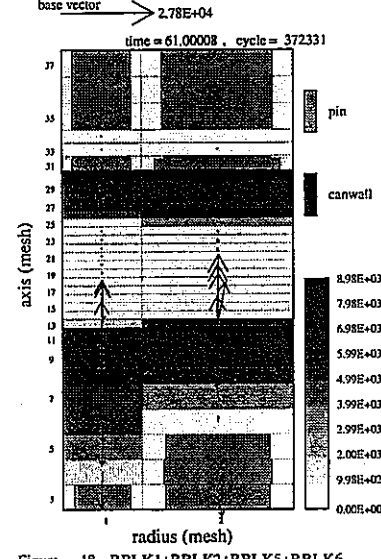


Figure 18. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.3.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量(LABのみ削除/UAB有り) (2/5)

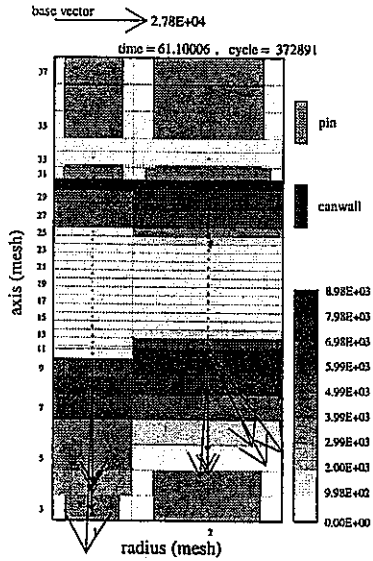


Figure 19. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

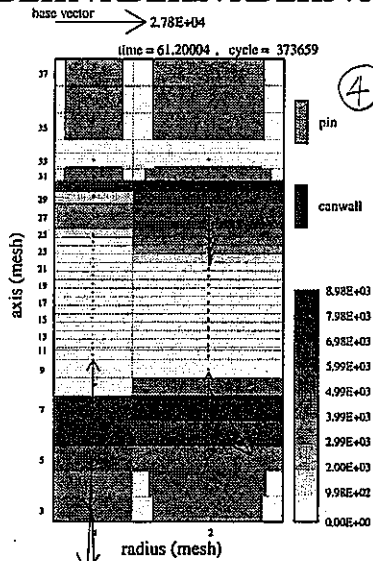


Figure 20. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

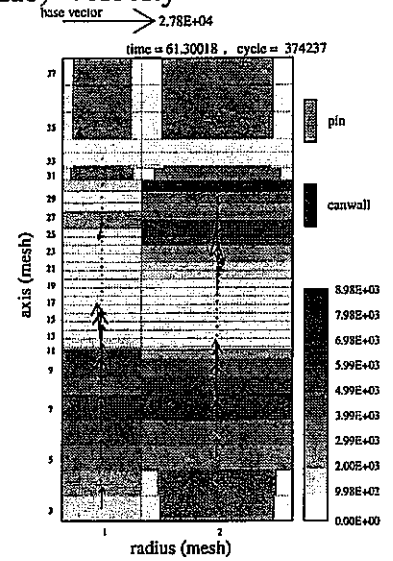


Figure 21. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

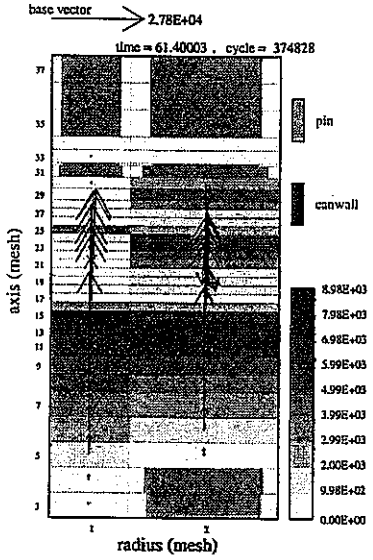


Figure 22. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

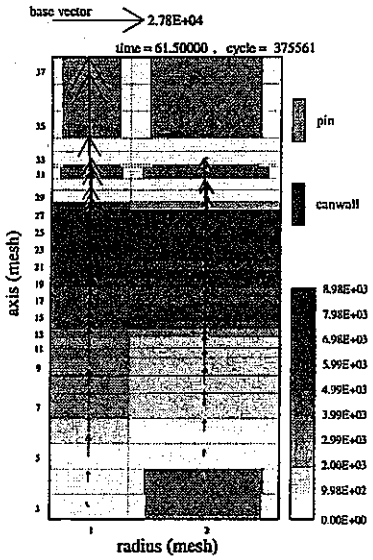


Figure 23. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

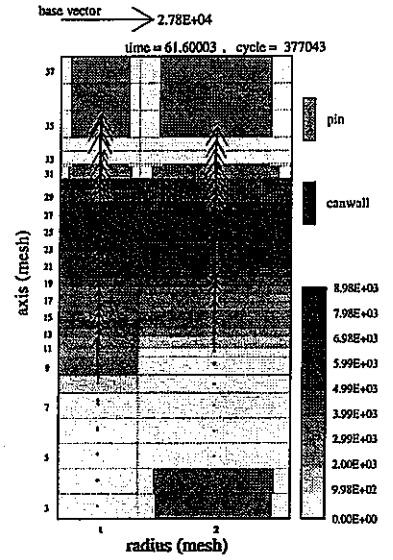


Figure 24. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

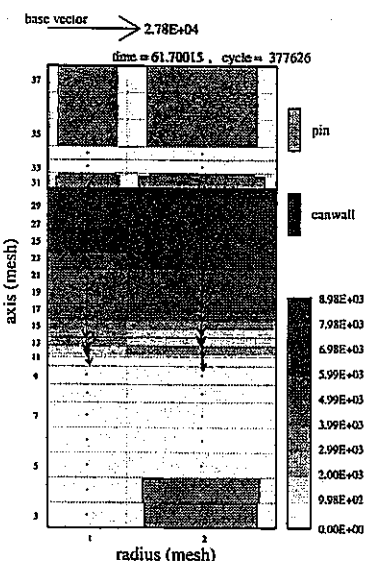


Figure 25. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

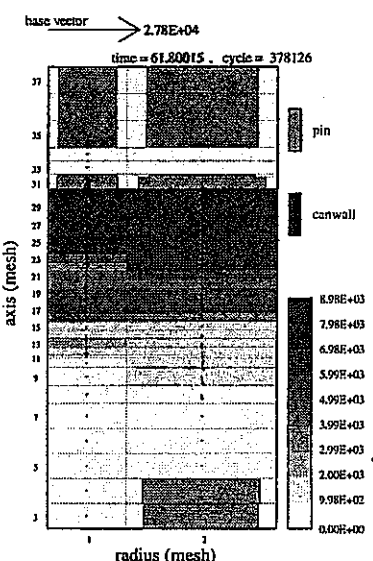


Figure 26. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

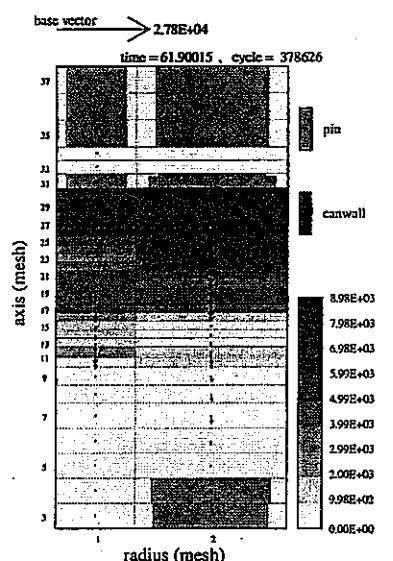


Figure 27. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.3.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量(LABのみ削除/UAB有り) (3/5)

Fri Apr 7 20:02:19 2000

nlp.ins.uab.CPVS

(RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6)*velocity-

1

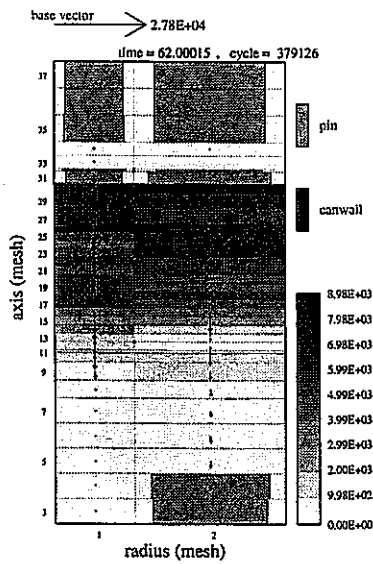


Figure 28. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

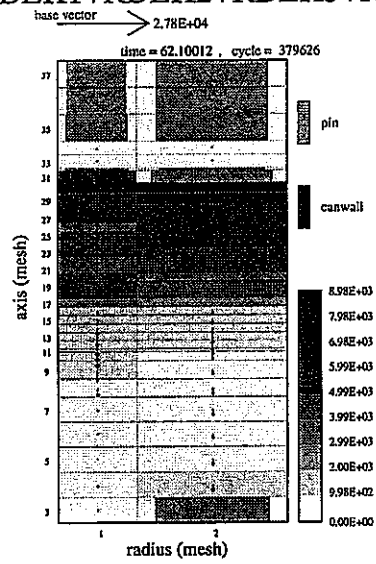


Figure 29. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

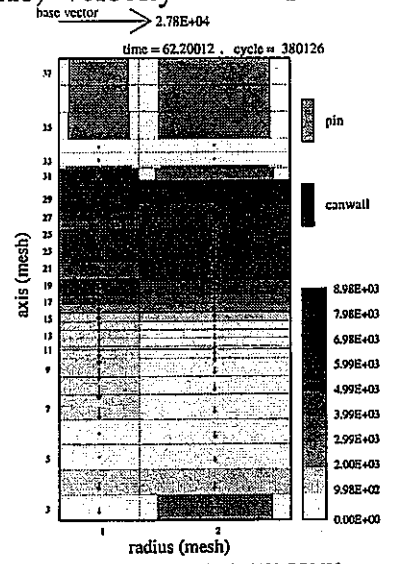


Figure 30. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

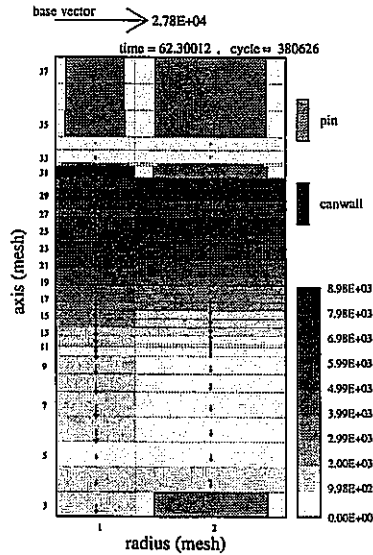


Figure 31. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

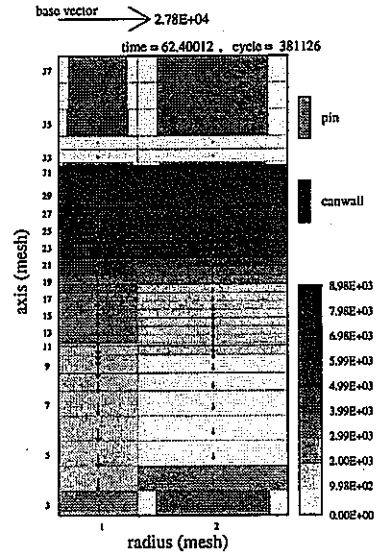


Figure 32. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

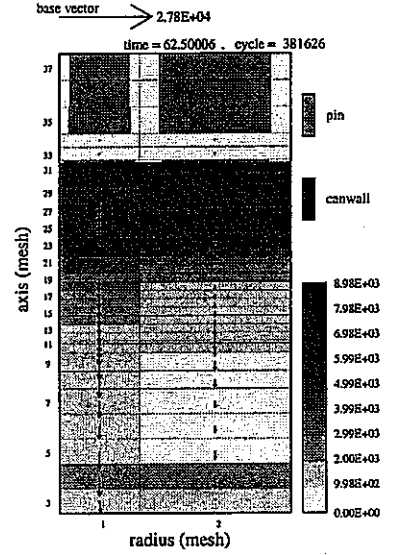


Figure 33. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

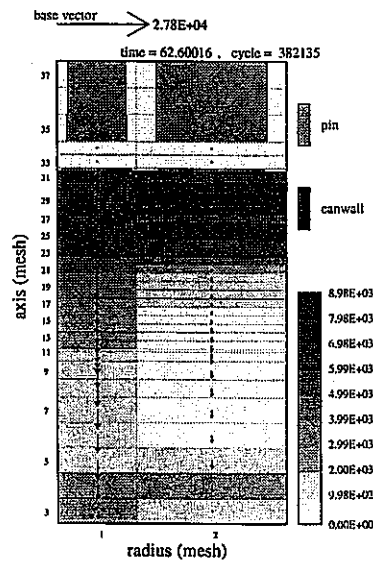


Figure 34. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

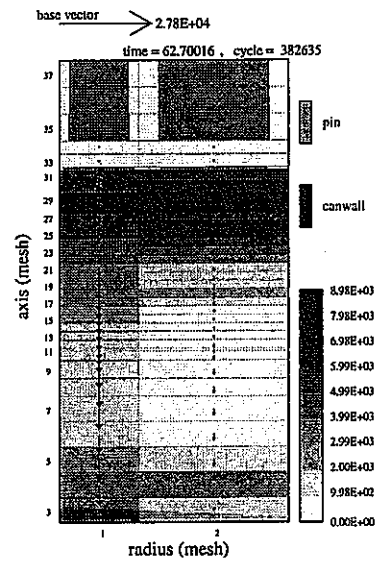


Figure 35. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

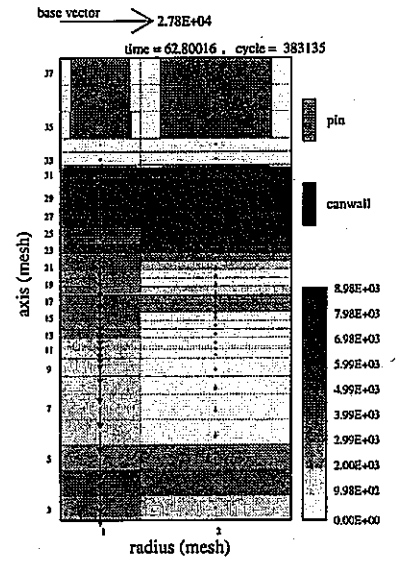


Figure 36. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.3.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量(LABのみ削除/UAB有り) (4/5)

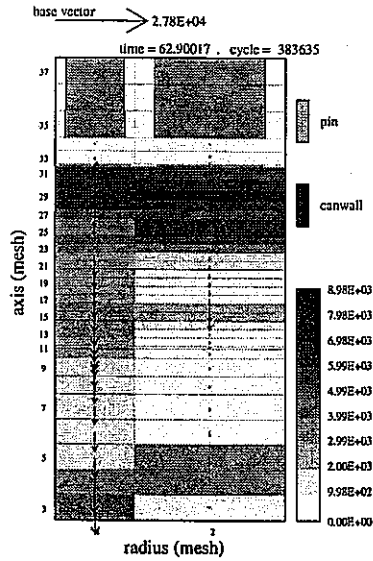


Figure 37. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

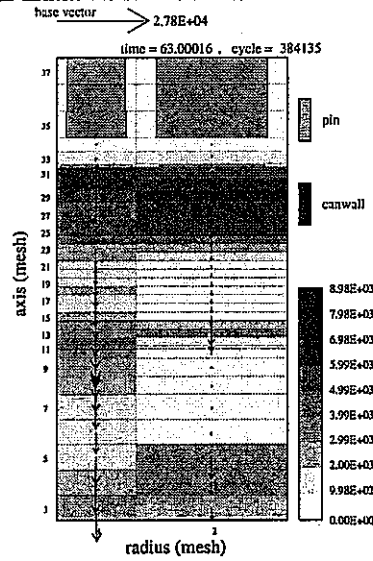


Figure 38. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

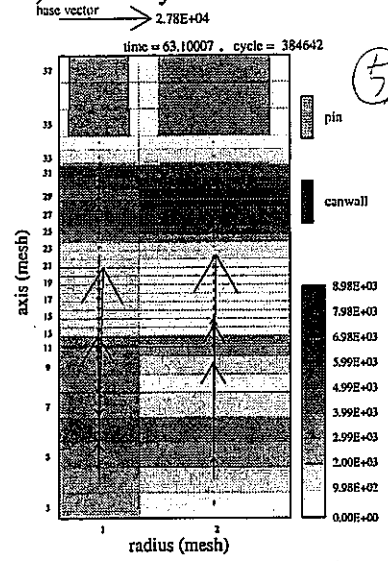


Figure 39. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

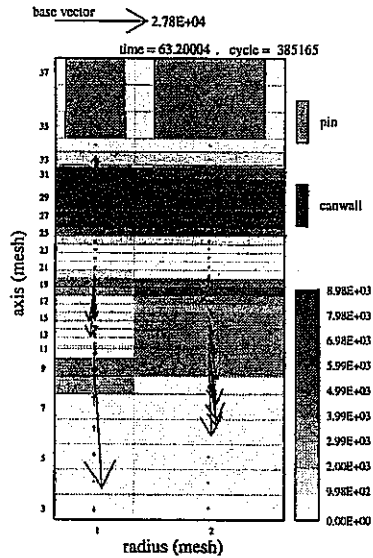


Figure 40. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

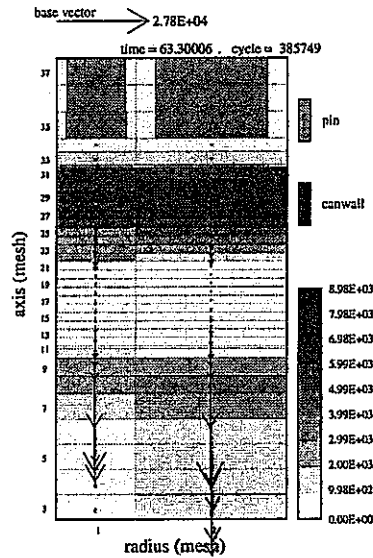


Figure 41. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

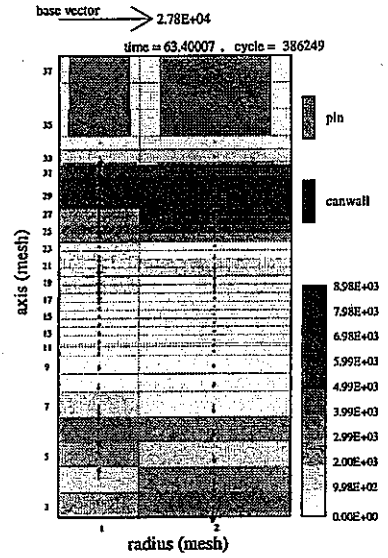


Figure 42. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

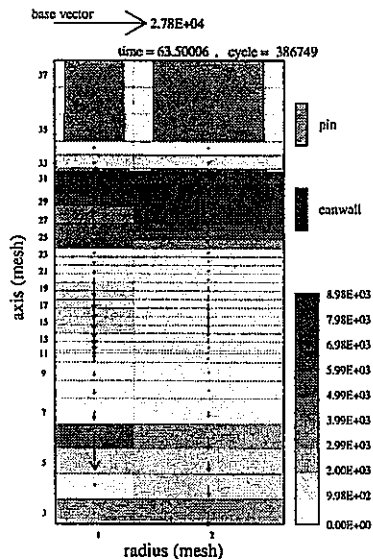


Figure 43. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.3.(1)-3 破損燃料の密度分布と運動量(LABのみ削除/UAB有り) (5/5)

LAB一部削除型集合体
(LABのみ削除/UAB有り)

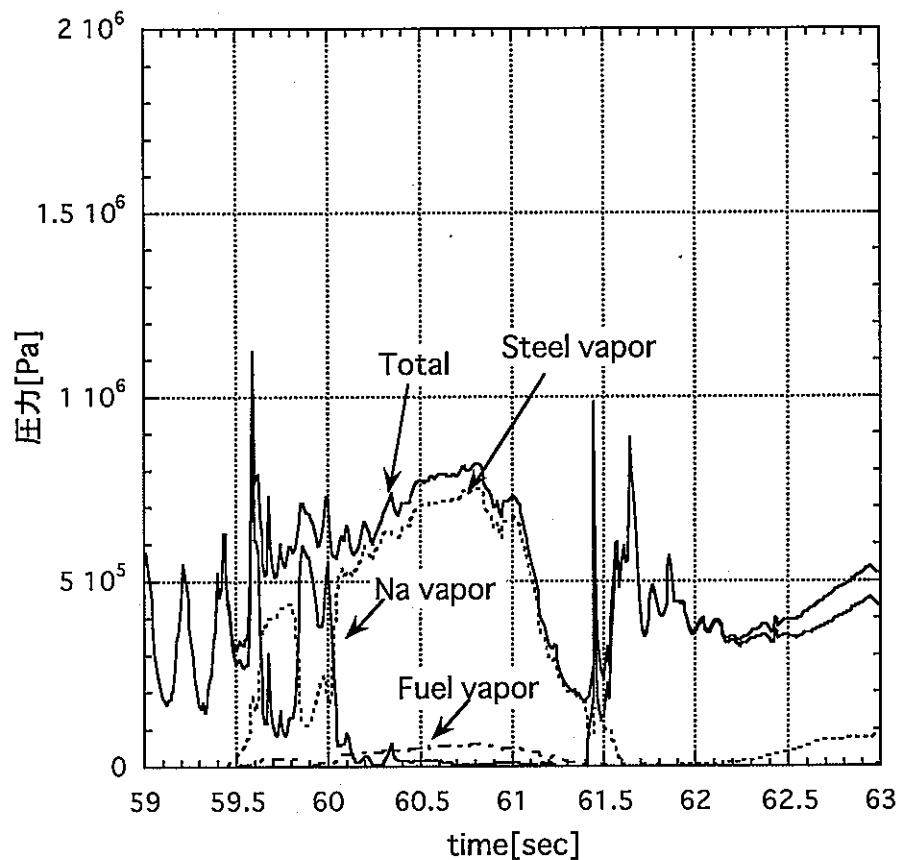
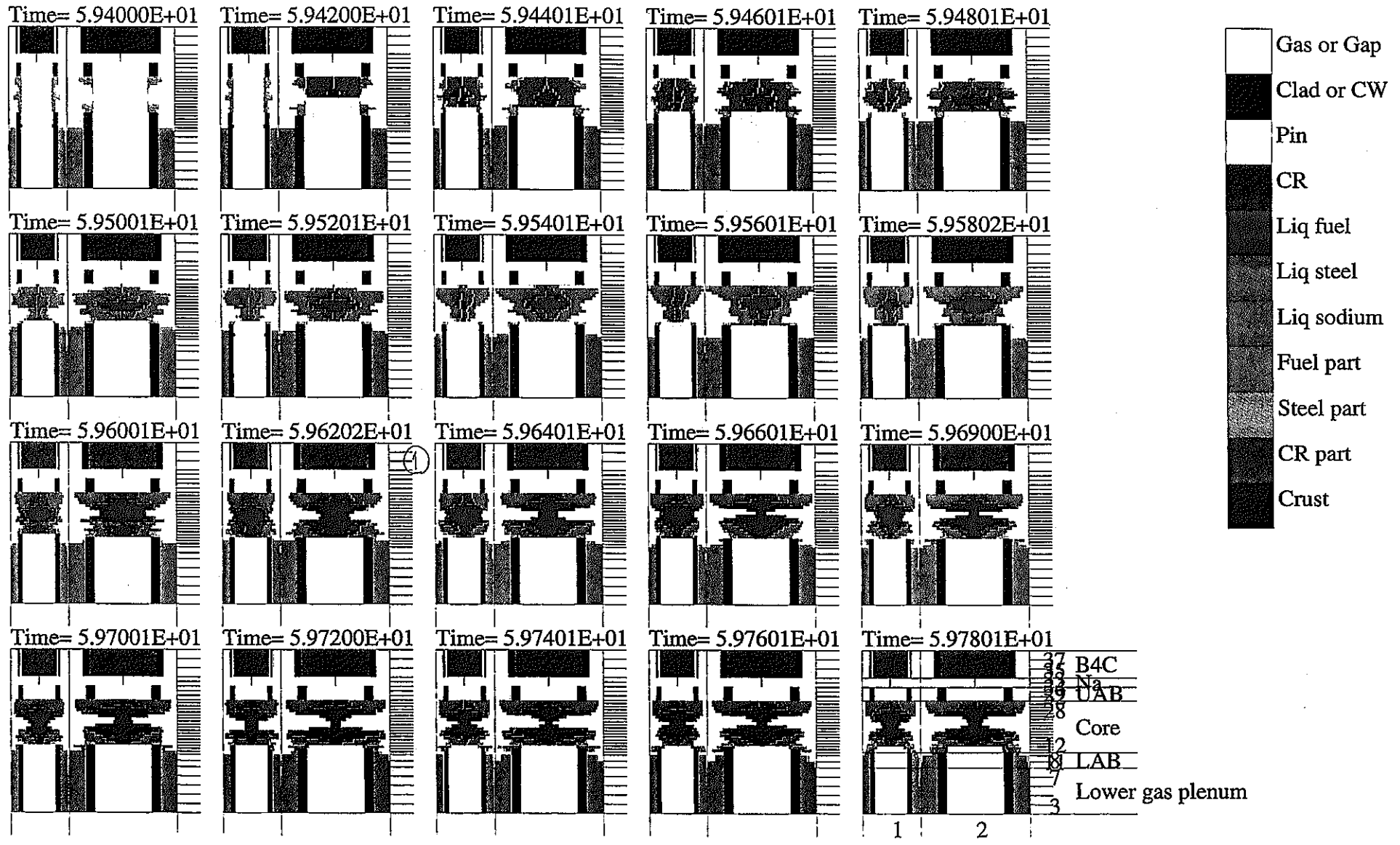
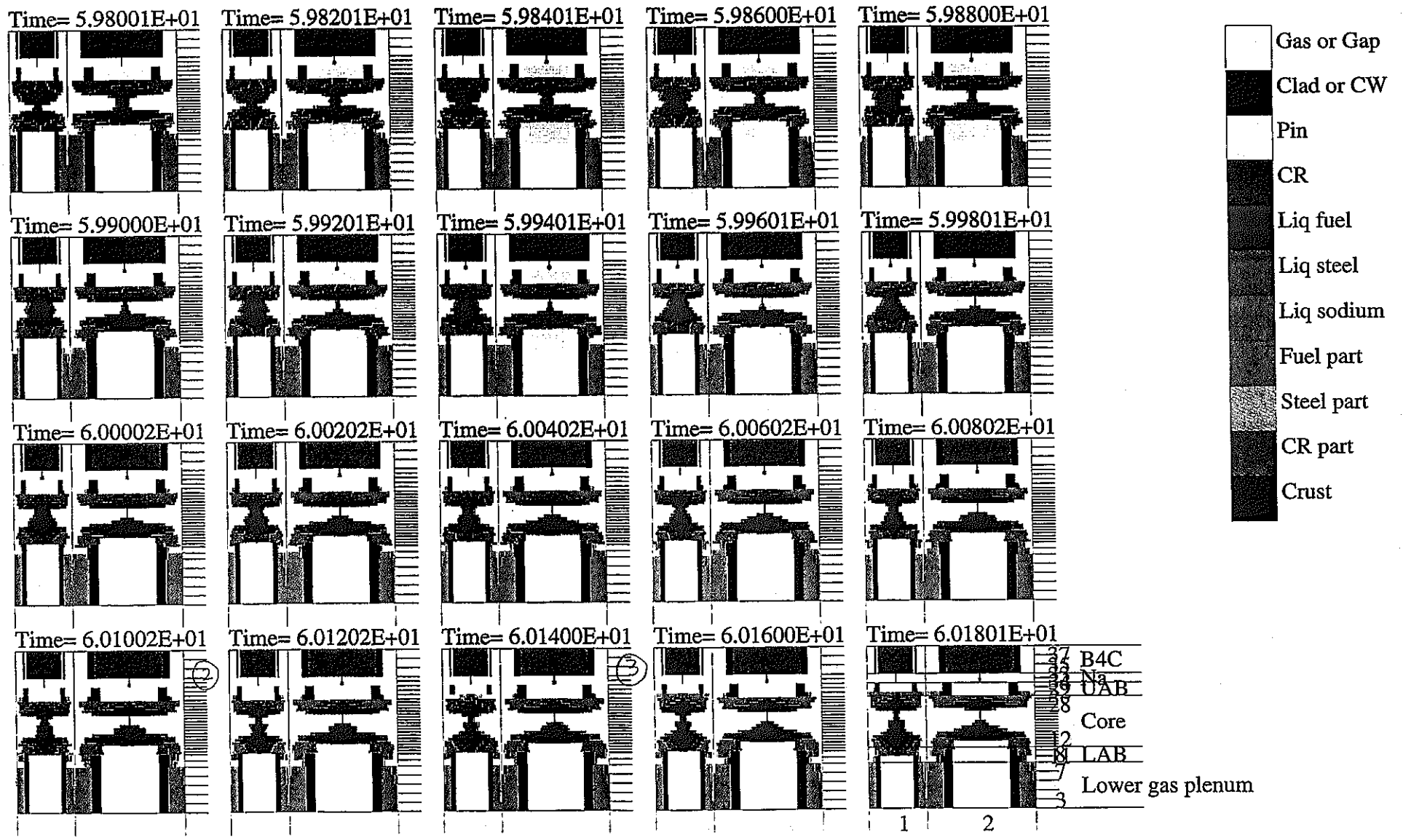


図 4.3.(1)-4 炉心燃料領域の圧力履歴 (LAB のみ削除/UAB 有り)



[i= 1, 2] [j= 3, 37]

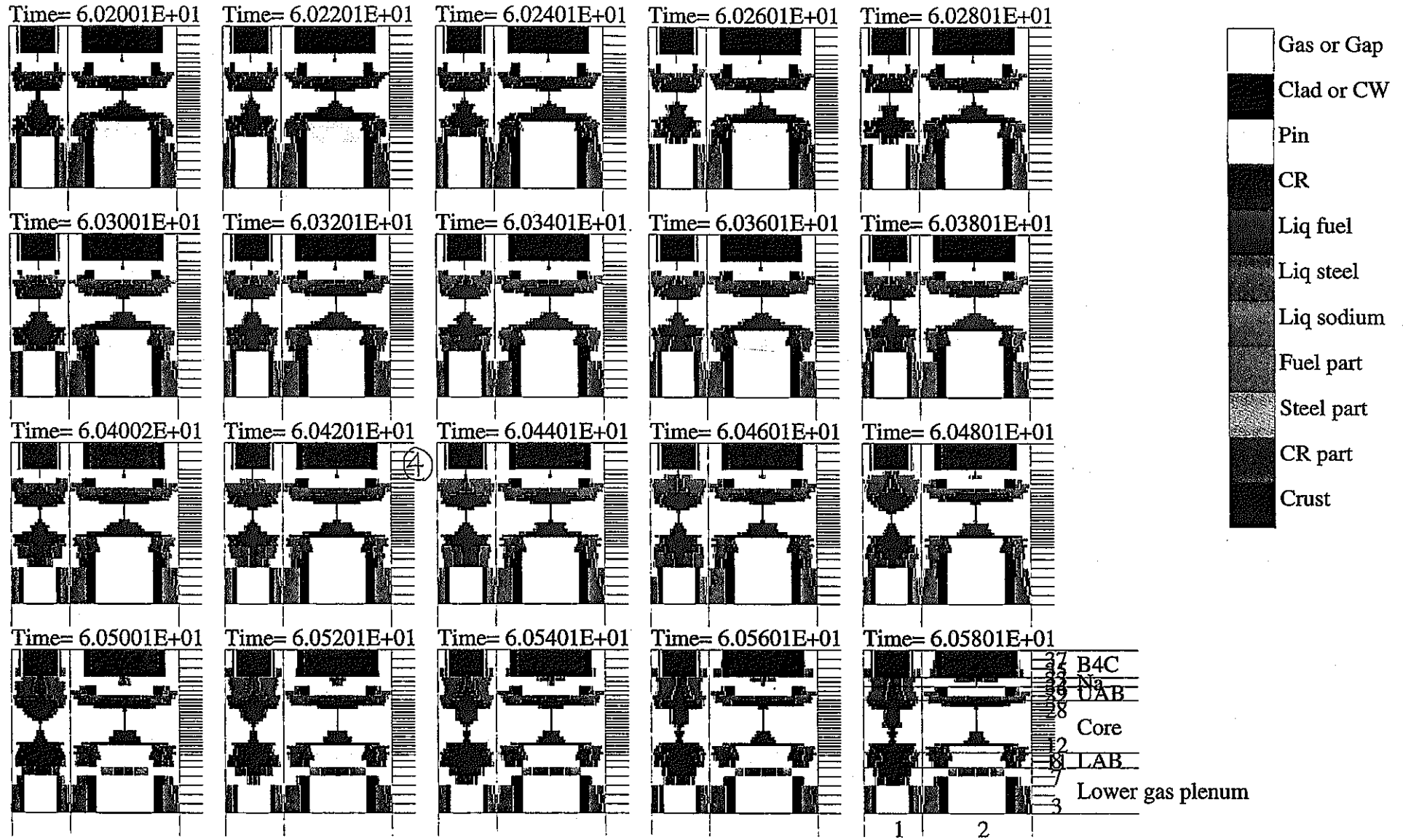
図 4.3.(2)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 無し) (1/4)



— 89 —

[i= 1, 2] [j= 3, 37]

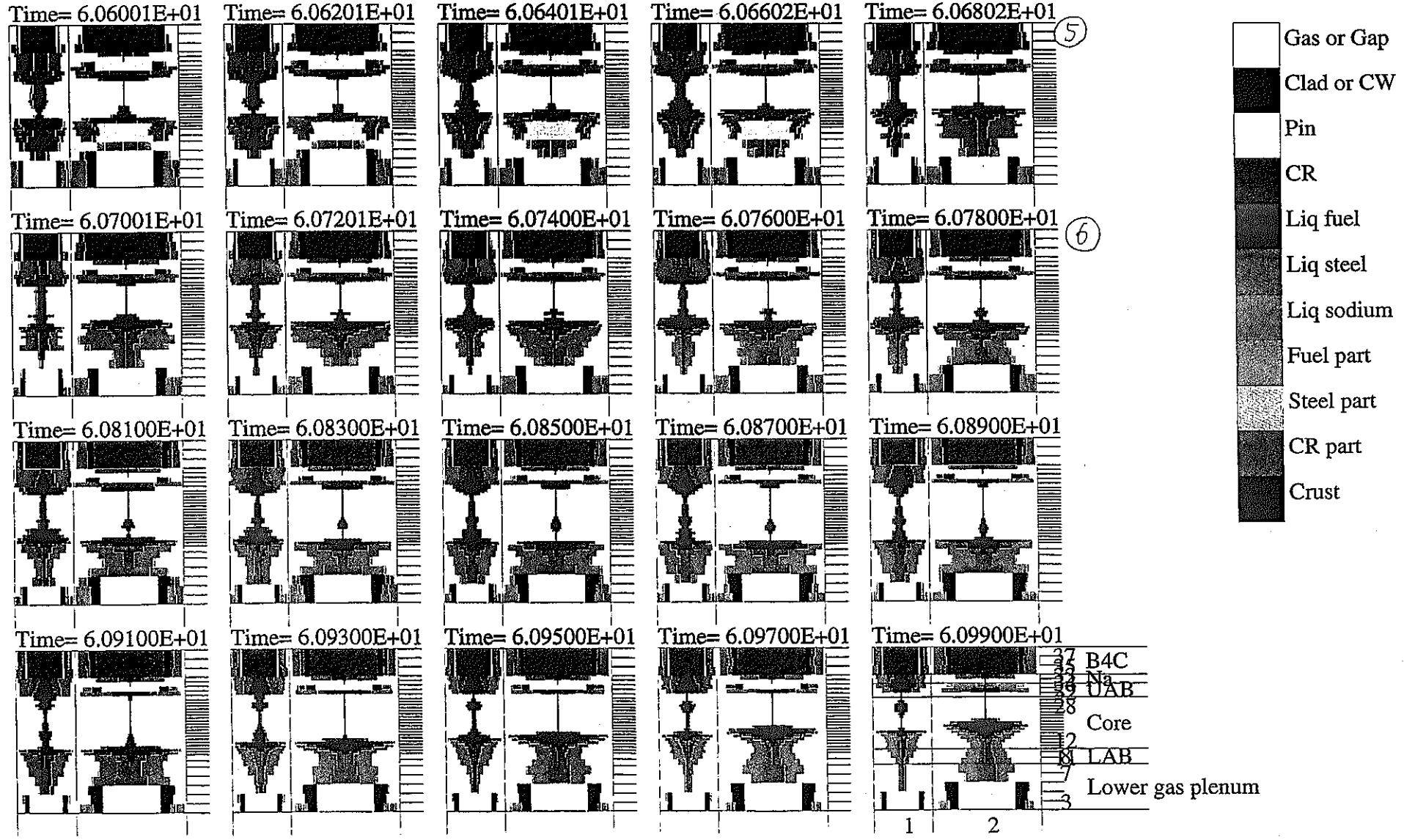
図 4.3.(2)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 無し) (2/4)



—90—

[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(2)-1 各成分体積率 (LAB のみ削除/UAB 無し) (3/4)



-91-

[i= 1, 2] [j= 3, 37]

図 4.3.(2)-1 各成分体積率 (LABのみ削除/UAB無し) (4/4)

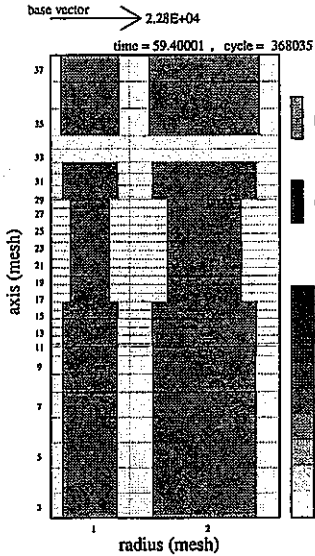


Figure 1. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

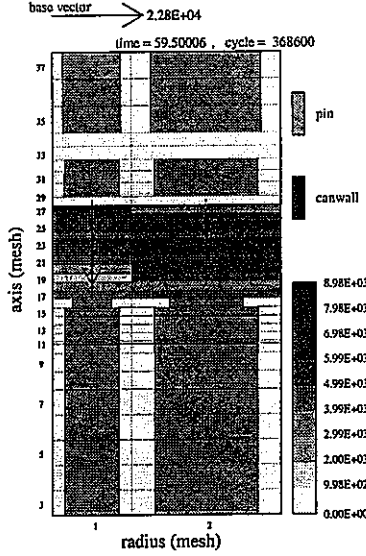


Figure 2. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

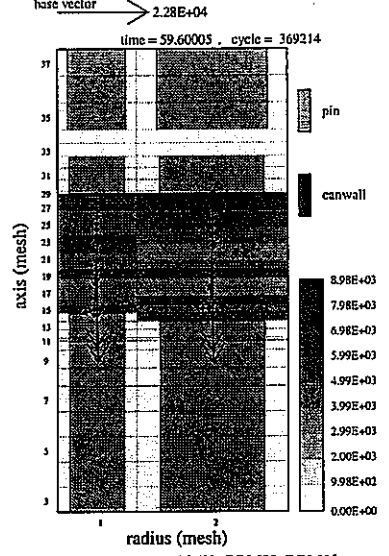


Figure 3. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

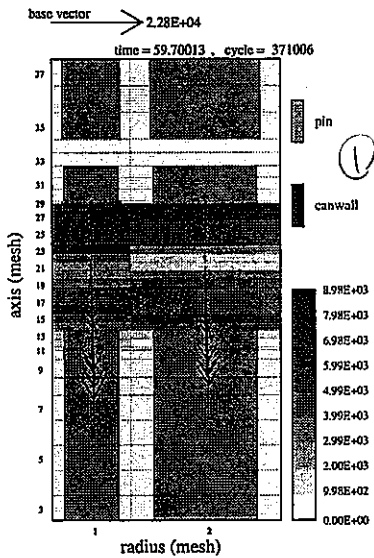


Figure 4. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

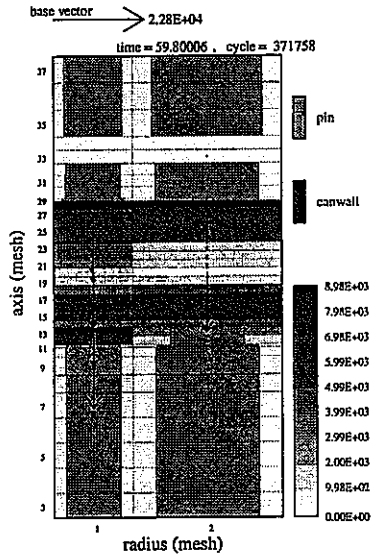


Figure 5. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

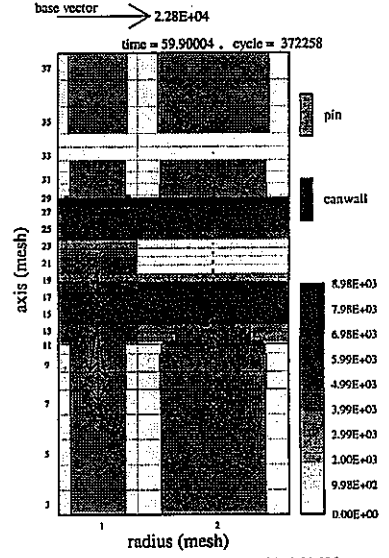


Figure 6. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

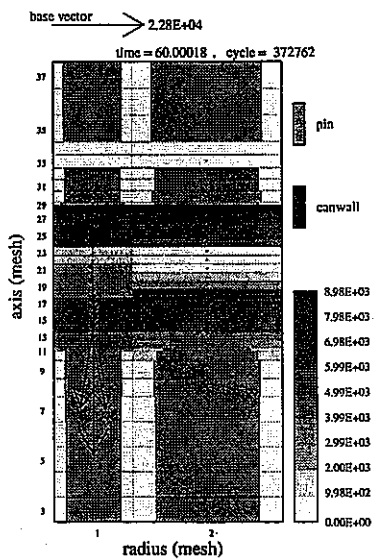


Figure 7. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

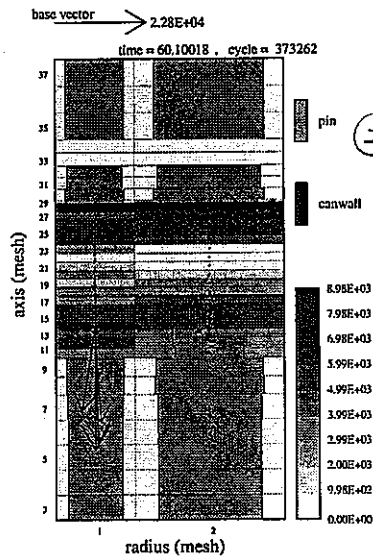


Figure 8. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

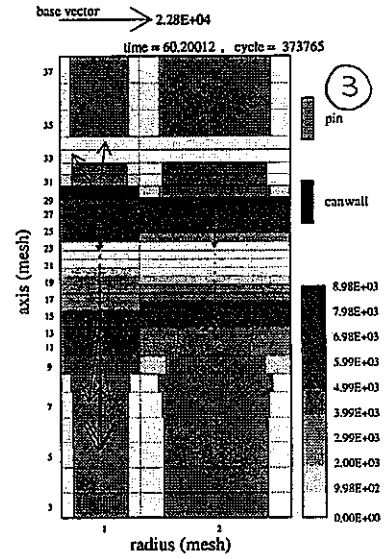


Figure 9. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.3.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (LABのみ削除/UAB無し) (1/2)

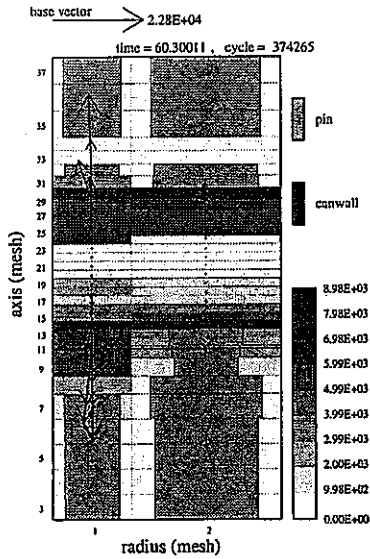


Figure 10. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

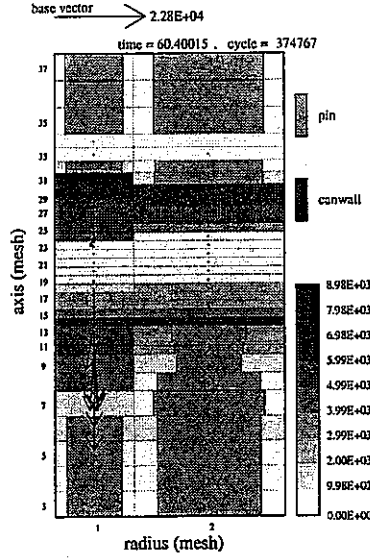


Figure 11. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

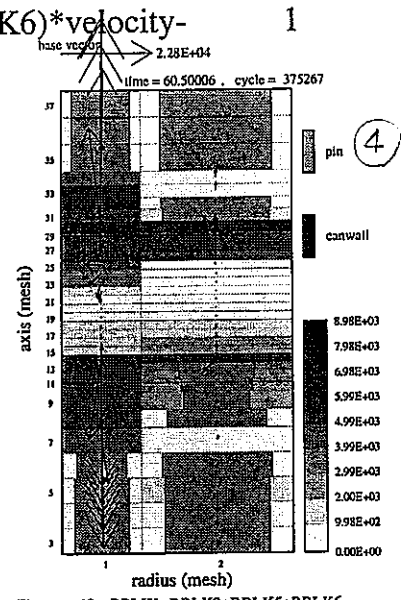


Figure 12. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

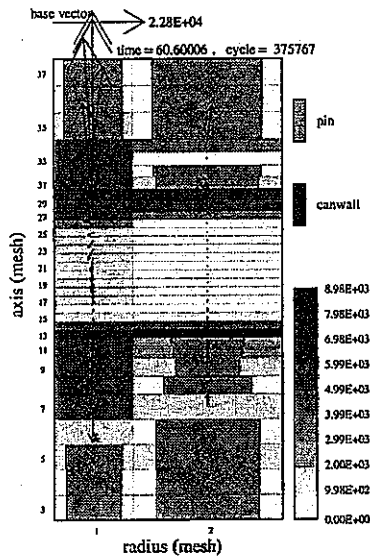


Figure 13. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

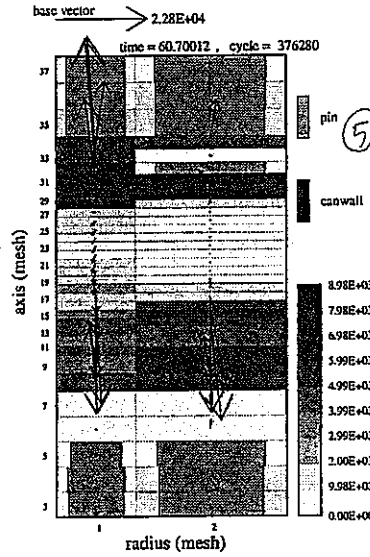


Figure 14. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

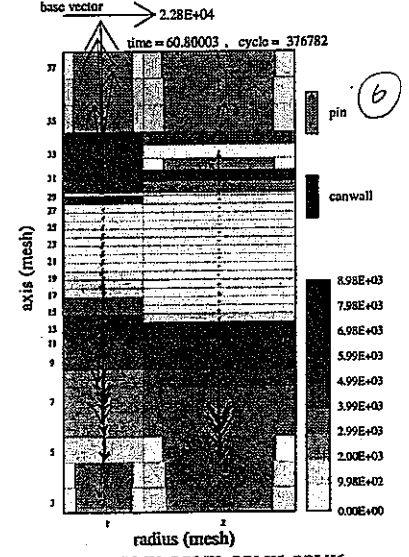


Figure 15. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

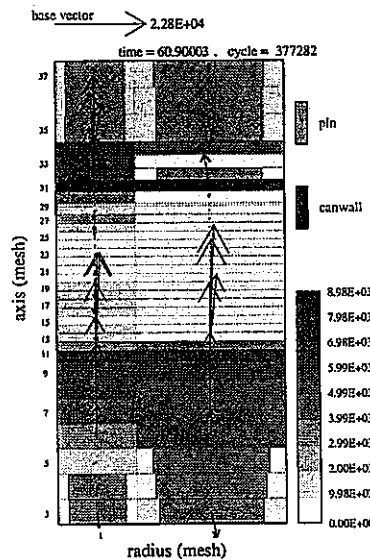


Figure 16. RBLK1+RBLK2+RBLK5+RBLK6

図 4.3.(2)-3 破損燃料の密度分布と運動量 (LABのみ削除/UAB無し) (2/2)

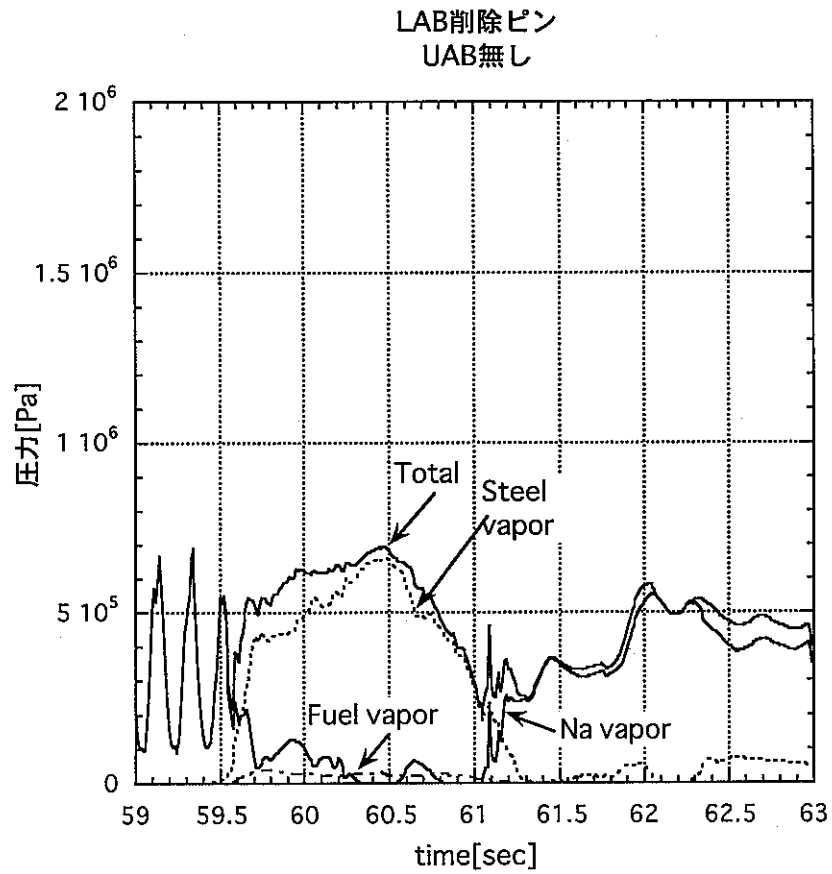


図 4.3.(2)-4 炉心燃料領域の圧力履歴 (LAB のみ削除/UAB 無し)

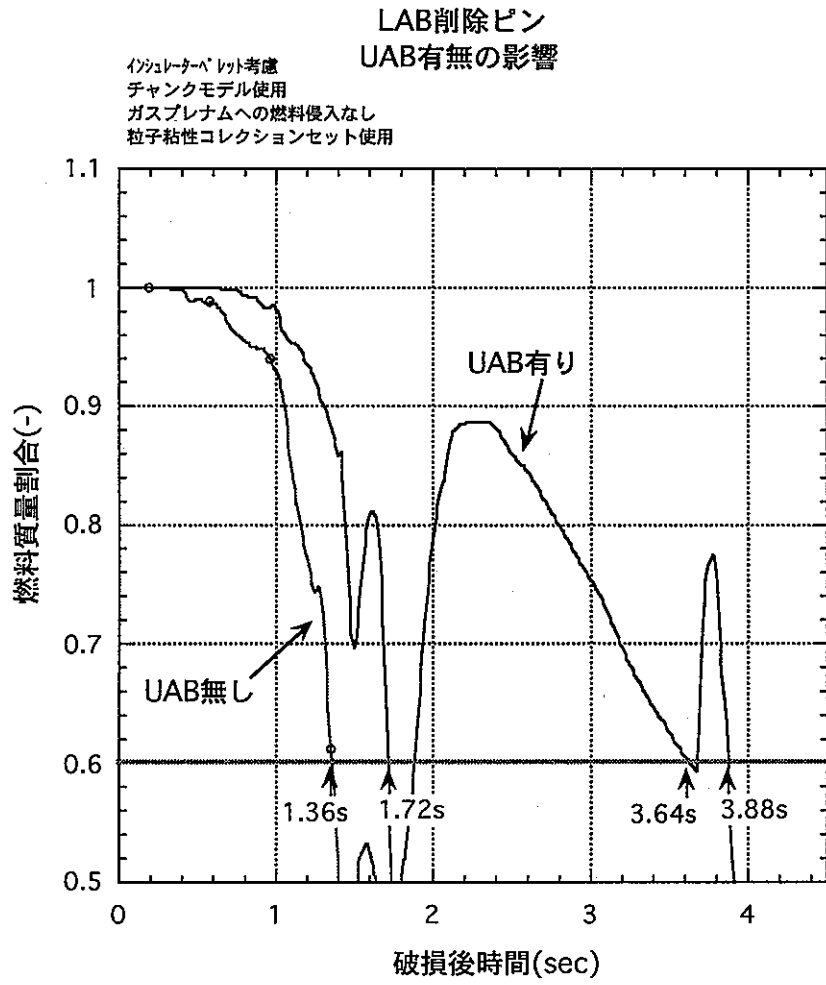


図 4.3.(2)-5 UAB 有無の比較

再臨界回避方策の燃料流出挙動

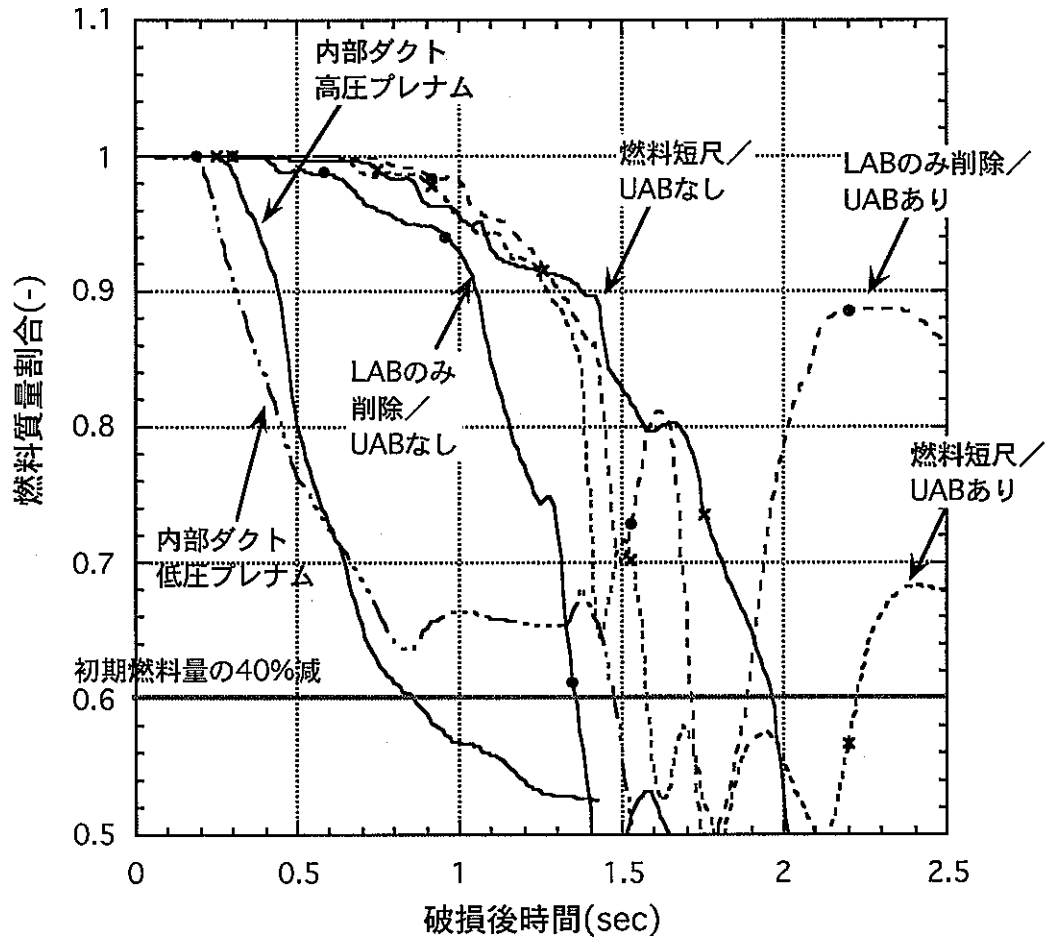


図 5.1 再臨界回避方策の候補の燃料流出挙動の比較

内部ダクト破損タイミングと比エンタルピー
FAIDUS炉心との比較

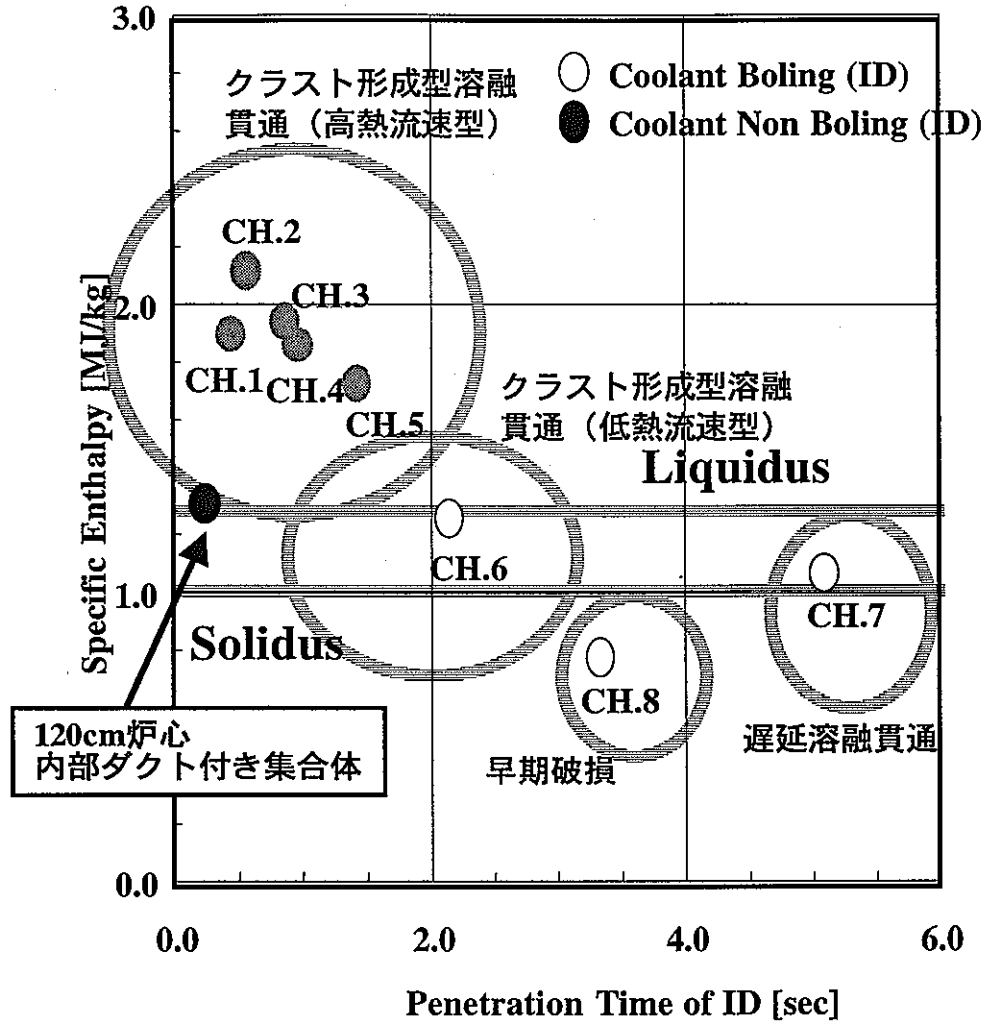


図5.2 内部ダクト破損機構と破損タイミング
(FAIDUS炉心との比較)