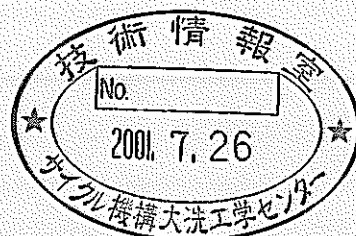


ピン型MOX燃料炭酸ガス冷却高速増殖炉 のULOF事象評価

(研究報告)



2001年3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, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

ピン型 MOX 燃料炭酸ガス冷却高速増殖炉の ULOF 事象評価 (研究報告)

山野秀将*、飛田吉春**

要旨

実用化戦略調査研究の第1期における候補概念の一つであるピン型 MOX 燃料炭酸ガス冷却炉の炉心損傷事故 (CDA) 評価を SIMMER-III コードにより実施した。本研究の目的は、ガス炉における CDA 事象推移とその特性を把握するとともに再臨界回避方策の必要性を判断することである。本解析では、代表的な事象として流量喪失事故 (ULOF) を選定した。

事象推移は次のとおりである。炉心から被覆管が溶融移動することにより、反応度は即発臨界を超過して出力バーストが発生する。反応度のピークはドップラーによる負の反応度効果により収まる。燃料破損直後、溶融燃料が流路ガスを加熱すること、また FP ガスが放出されることにより炉心部の圧力が高まる。これによって溶融燃料は主として流動抵抗の小さな下方へ流出し、反応度は未臨界状態に静定する。この事象推移は、被覆管溶融移動の非同時性を考慮して反応度挿入率を低下させても定性的には変わらない。

ガス炉では、被覆管溶融移動のみによって反応度印加を生じるため、これを緩和する方策はない。ただし、再臨界が発生したとしても、スラグインパクトの作動流体としての液体冷却材が存在しないため、炉容器バウンダリへの機械的負荷はきわめて小さい。一方、燃料破損直後に炉心圧力レベルが過大になる場合には、炉心上部構造物 (UCS) がミサイル化して上部プレナムへ飛び出す可能性があり、設計対応が必要であると考えられる。

本解析対象とした設計では、下部軸ブランケット (LAB) が 10cm と短いので、大量の溶融燃料が閉塞せずに幅広いピン束流路を通して炉外へ継続的に流出する可能性は高く、再臨界回避方策は不要である。一方で、高増殖比を目標として 40cm 程度の下部軸ブランケット長さを採用する場合、燃料固化モデルの不確定性及び流路内のグリッドスペーサなどの熱・流動抵抗を考慮すると、通常集合体では炉心外への大量の燃料流出は困難であると考えられる。ただし、新しい燃料集合体設計のアイデアの一つである軸ブランケット一部削除 (ABLE) 型燃料集合体によって再臨界排除は可能と考えられる。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 高速炉安全工学 Gr

** 大洗工学センター システム技術開発部 リスク評価技術開発 Gr
要素技術開発部 高速炉安全工学 Gr 兼務

An Evaluation of ULOF Event Sequences for Pin-Type MOX-Fueled, Carbon-Dioxide-Cooled Fast Breeder Reactor

Hidemasa YAMANO*, Yoshiharu TOBITA**

Abstract

We carried out the analyses of a core-disruptive-accident (CDA) sequence using a SIMMER-III code for a pin-type MOX-fueled, carbon-dioxide-cooled fast breeder reactor, which is a one of candidate concepts in Phase 1 of Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System. The objectives of this study were: to draw a rough sketch of CDA event sequences, to understand the characteristics of CDA, and to judge whether the measures to eliminate energetic recriticality are necessary or not. In the present analysis, an unprotected loss-of-flow (ULOF) accident was chosen as a representative CDA.

The analysis showed that a power burst occurred when the reactivity reached prompt criticality as a result of molten cladding relocation out of the core. The negative reactivity feedback due to Doppler effect determined the power peak and the energy release. High pressure generation as a result of rapid heating of the channel gas by the ejected molten fuel and fission gas discharge allowed the molten fuel to disperse mainly toward a downward direction, which has the small flow resistance, then the reactivity settled down under the sub-critical condition. This sequence did not vary much qualitatively, even if a smaller reactivity ramp rate was applied to take into account the incoherency of the molten cladding motion.

The gas-cooled reactor has no measures to mitigate the positive reactivity effect caused by the molten cladding motion. However, the mechanical loading to the reactor vessel boundary is negligibly small due to the absence of liquid coolant as a working fluid for the slug impact even if the recriticality occurs. On the other hand, the countermeasure to prevent the upper core structures (UCS) from being accelerated as a solid missile by the high pressure in the core just after the fuel disruption might be necessary.

In the present design with the short lower axial blanket (LAB) of 10cm length, the measure for avoiding the energetic recriticality is not necessary because a large amount of molten fuel is removed continuously from the core through the pin bundle in the LAB region without forming blockages. In the case of extended LAB length to 40cm in order to achieve a higher breeding ratio, the fuel removal out of the core was concluded to be insufficient to avoid energetic recriticality due to the uncertainty concerning the fuel-freezing model and the existence of grid spacer in LAB. Nevertheless, the avoidance of energetic recriticality is thought to be possible by the introduction of an axial blanket partial eliminated (ABLE) concept, which is a one of new fuel subassembly designs.

* Fast Reactor Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC.

** Nuclear System Safety Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC. (Fast Reactor Safety Engineering Group as an additional post.)

目次

要旨	i
Abstract	ii
目次	iii
List of Tables	v
List of Figures	vi
1 序論	1
2 ピン型燃料炭酸ガス炉の特徴と基本仕様	3
2.1 原子炉プラントの特徴	3
2.2 安全上の特徴	3
2.3 基本仕様	4
3 解析条件	5
3.1 解析体系及び条件	5
3.1.1 解析体系	5
3.1.2 幾何形状データ	5
3.1.3 被覆管及び燃料の熔融破損判定	5
3.1.4 燃料の固化及び変形・崩壊	5
3.1.5 核計算	6
3.2 定常計算により求めた初期及び境界条件	6
3.3 過渡条件	6
4 ULOF 事象推移の解析結果	7
4.1 LOF 開始初期	7
4.2 反応度過渡変化	7
4.2.1 出力バースト前	7
4.2.2 出力バースト	7
4.2.3 出力バースト後	8
4.3 計算終了時の炉心最終状態	8
5 解析結果の考察・検討	9
5.1 被覆管熔融移動の非同時性の影響	9
5.1.1 非同時性を考慮した反応度挿入率	9
5.1.2 解析結果	9
5.2 高増殖炉心における軸ブランケット長の影響（集合体規模解析）	10
5.3 燃料固化モデルの影響	10
5.3.1 全炉心解析	10
5.3.2 集合体規模解析	11
5.4 簡易モデルによる融体侵入長の評価	11
5.4.1 これまでの実験結果と簡易モデルによる予測値との比較	11
5.4.2 ガス炉における融体侵入長	12
5.4.3 水力等価直径と融体侵入長との関係	12
5.5 事故影響の炉容器内格納性	13
6 結論	14
記号表	15
謝辞	16

参考文献.....	17
付録 A 入力データの作成.....	62
付録 B 全炉心解析用入力データ.....	68
付録 C コレクションセット.....	73
付録 D 定常計算による流量配分の調整.....	74
付録 E 被覆管溶融移動の非同時性を考慮したときの反応度挿入率.....	77

List of Tables

表 1	ピン型燃料炭酸ガス炉の基本仕様 [2]	18
表 2	燃料ピン及びラッパ管の構造物の幾何形状データ	19
表 3	入口境界で与える圧力	19
表 4	物性値	19
表 5	簡易モデルにより予測された燃料侵入長と実験結果との比較	20
表 6	ガス炉における燃料侵入長の参考予測値	20
表 A-1	冷却材物性値	64
表 A-2	各領域における原子数密度	65
表 A-3	70 群及び 18 群エネルギー構造	66
表 A-4	混合成分毎の物質密度及び原子数密度	67
表 D-1	SIMMER-III の核計算モデルから求めた出力密度分布	74
表 D-2	規格化された出力密度分布	75
表 D-3	参考にした P/F 分布とガス炉の設定	75
表 D-4	定常計算による流量配分の調整	76
表 E-1	静的核計算による 1 集合体当りの反応度	78
表 E-2	非同時性を考慮した反応度履歴	79

List of Figures

図 1	ピン型燃料炭酸ガス炉の原子炉構造図 [2]	21
図 2	ピン型燃料炭酸ガス炉のリファレンス炉心配置 [2]	22
図 3	解析体系	23
図 4	冷却材の質量流量	24
図 5	冷却材流速	24
図 6	反応度と規格化出力	25
図 7	物質分布	26
図 8	反応度と炉心内 Fissile 燃料及びスチールの質量履歴	31
図 9	第 1 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度	31
図 10	midplane における圧力履歴	32
図 11	第 1 リングにおける燃料破損直後の軸方向圧力分布	32
図 12	第 2 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度	33
図 13	第 3 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度	33
図 14	積算出力	34
図 15	炉心内燃料平均温度	34
図 16	炉心内 Fissile 燃料の質量履歴	35
図 17	炉心内スチールの質量履歴	35
図 18	Fissile 燃料の分布	36
図 19	被覆管溶融移動の非同時性を考慮した反応度挿入率	36
図 20	反応度及び規格化出力（非同時性を考慮した場合）	37
図 21	反応度履歴の比較	37
図 22	非同時性を考慮した場合の物質分布	38
図 23	第 1 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度（非同時性を考慮した場合）	42
図 24	積算出力の比較	42
図 25	炉心内 Fissile 燃料の質量履歴（非同時性を考慮した場合）	43
図 26	Fissile 燃料の分布（非同時性を考慮した場合）	43
図 27	集合体規模解析で用いた出力履歴	44
図 28	投入エネルギーの履歴	44
図 29	リファレンス炉心における物質分布（集合体規模解析）	45
図 30	高増殖炉心における物質分布（集合体規模解析）	47
図 31	リファレンス炉心における Fissile 燃料の分布（集合体規模解析）	49
図 32	高増殖炉心における Fissile 燃料の分布（集合体規模解析）	49
図 33	反応度及び規格化出力（Bulk freezing model を用いた場合）	50
図 34	反応度履歴の比較	50
図 35	Bulk freezing model を用いた場合の物質分布	51
図 36	積算出力の比較	55
図 37	Fissile 燃料の分布（Bulk freezing model を用いた場合）	55
図 38	Bulk freezing model を用いた場合のリファレンス炉心における物質分布	56
図 39	Bulk freezing model を用いた場合の高増殖炉心における物質分布	58
図 40	リファレンス炉心における Fissile 燃料の分布（Bulk freezing model）	60
図 41	高増殖炉心における Fissile 燃料の分布（Bulk freezing model）	60

図 42 実験結果と Fuel caps freezing モデルによる予測値との比較.....	61
図 43 水力等価直径と融体侵入長の予測値との関係.....	61
図 A-1 1次元拡散計算における解析体系	67
図 D-1 定常計算における質量流量の履歴	76
図 E-1 midplane 付近における被覆管の温度履歴	80
図 E-2 被覆管の温度上昇率	80
図 E-3 1 集合体当りの反応度変化率	81
図 E-4 被覆管溶融移動の非同時性を考慮した反応度履歴	81

1 序論

FBR サイクルの実用化戦略調査研究は、安全性を大前提として、軽水炉サイクルやその他の基幹電源と比肩する経済性を達成し得るよう、FBR サイクルが本来有する長所を最大限に活用した実用化像を抽出し、併せて将来の社会の多様なニーズに柔軟に対応できる開発戦略を提示することにより、FBR サイクルを将来の主要なエネルギー供給源として確立する技術体系を整備することを目的としている。平成 11 年 7 月に、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）を中心として、電気事業者（9 電力会社、電源開発、日本原子力発電）、電力中央研究所、メーカー各社で構成する推進組織を作り、本格的に研究を開始した。その後、日本原子力研究所の参加を得て、現在わが国の総力を結集したオールジャパン体制で研究を進めている。この研究は、第 1 期（平成 11 年度～12 年度）では、国内外で蓄積された研究成果を基に、革新技術を採用した幅広い技術選択肢の検討評価を行い、有望な実用化候補概念を抽出する。その後の第 2 期（平成 13 年度～17 年度頃）では、候補概念を比較評価するための概念設計や必要な工学試験、要素技術開発を行い、実用化候補概念の絞り込み（複数）を行うとともに、必須の研究テーマを特定する。そして、「もんじゅ」における研究開発成果等も加え、最終的には、2015 年頃に、競争力のある FBR サイクル技術を提示することを目標としている。

ガス炉システムは、実用化戦略調査研究の第 1 期における候補概念の一つに挙げられており、ピン型燃料炭酸ガス炉、ピン型燃料ヘリウムガス炉、被覆粒子燃料ヘリウムガス炉の 3 タイプが考えられている [1]。本報で検討したピン型燃料炭酸ガス炉（EGCR: Enhanced Gas-Cooled fast Reactor）は、炭酸ガス冷却熱中性子炉 AGR と同様に 4.2MPa の炭酸ガスを冷却材とし、ナトリウム炉と同様の密封型金属被覆の MOX 燃料を使用する高速炉であり、現有技術の延長線上での性能向上と経済性の追求を着眼点とした概念である。これまでの炭酸ガス冷却高速炉の設計例として、低開発リスクを目指した ETGBR（Existing Technology Gas-cooled Breeder Reactor）がある。この設計研究は、1970 年代から 1980 年代初頭にかけて英国 CEGB/NNC によって進められ、実現可能性を確認されたが、当時の欧州における高速炉開発はナトリウム炉が主流で、各国との協調の観点から ETGBR の開発は棚上げされた。1990 年代に入り、AGR の良好な運転実績による信頼性が実証されたこと、開発費用を含む経済性に優れる可能性があること、Pu インベントリに対する要求条件の緩和等から GCFR の検討が再開された。実用化戦略調査研究の第 1 期におけるピン型燃料炭酸ガス炉の設計検討の新たな着眼点は、炉心性能の向上（高増殖率比、高燃焼度比）を目指し、有効な炉心損傷事故（CDA: Core Disruptive Accident）対策を考慮する点にある [2, 3]。

FBR の実用化にあたっては、軽水炉と同等ないしはそれ以上の安全性を確保するものとし、IAEA（国際原子力機関）の基本安全原則はもとより、現行の軽水炉に適用される基準及び指針類、「もんじゅ」の安全審査で適用された基準及び指針類、実証炉の安全基準案等の考え方を参考に、燃料形態及び冷却材の特徴を考慮した安全設計とすることとしている。具体的な安全要求としては、原子炉停止系は十分信頼性の高い設計とするが、これらの安全系に期待しなくとも、炉心損傷に至らずに自然に事象が終息できるよう、受動的な原理で原子炉を停止できる能力を持たせる。併せて、炉心冷却に関しても崩壊熱を自然循環により除去できる設計とする。また、仮想的な炉心損傷状態を仮定しても、大きな機械的エネルギー放出を伴わず自然に事象終息する

こと、例えばエネルギー放出の原因が排除できる炉心設計（再臨界問題を排除する炉心概念）とすることである。

再臨界問題の可能性を排除（以下、再臨界排除または回避という）するために、燃料破損集合体内の熔融燃料が隣接集合体のラッパ管壁を熔融・破損して、燃料プールが径方向に拡大する前に、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ことが有効である。早期燃料流出を促進するための方策として、これまで FAIDUS 炉心 [4, 5] を代表とする内部ダクト付き燃料集合体の他に、軸ブランケットの一部を削除した燃料集合体を装荷した再臨界回避概念が提案されており、ナトリウム炉における早期燃料流出の有効性について予備的な比較検討を行った [6]。

ガス冷却炉における安全評価は、これまで減圧事故（ETGBR では減圧時定数が 900 秒と長い [7]）を始めとした設計基準事象が多く、技術的に起こるとは考えられない CDA に関する事象推移評価は十分になされていなかった。そこで、本研究の目的は、ガス炉における CDA 事象推移とその特性を把握し、実用化戦略調査研究の安全要求の一つである再臨界回避方策の有効性・必要性を判断することとする。

本解析では、定格出力状態から短時間に炉心損傷に至る代表的な事象として異常な過渡時のスクラム失敗事象（ATWS: Anticipated Transient Without Scram）を選定した。実用化戦略調査研究の第 1 期では、ATWS 事象の中で代表的な冷却材喪失事象（ULOF: Unprotected Loss Of Flow）を対象として事象推移解析を実施した。なお、ガス炉の特徴を反映した減圧事故に関する評価は第 2 期で行う予定である。

従来のナトリウム炉における CDA の解析は、事故開始から燃料破損を経て損傷が集合体規模を超えて拡大するまでを対象とした起因過程と出力上昇により燃料が集合体内で熔融・分散配置した状態から炉心の熔融が徐々に拡大・進展する遷移過程を 2 段階で評価しており、前者に SAS4A コード [8]、後者に SIMMER-III コード [9, 10] を用いてきた。しかしながら、SAS4A は冷却材としてナトリウムしか取り扱うことができないため、炭酸ガスを冷却材とした本解析では、起因過程から SIMMER-III を用いた。SIMMER-III は炉心の軸方向熱膨張を模擬できないため、それによる負のフィードバックを無視することとなる。これは健全状態からの反応度挿入を過大に評価することとなる。

最後に本報告書の構成であるが、まず第 2 章では、ピン型燃料炭酸ガス冷却炉の特徴と基本仕様について記述する。第 3 章では、解析体系及び条件について述べる。第 4 章では、SIMMER-III による ULOF 事象推移の解析結果について記す。第 5 章では、第 4 章で得られた解析結果に対する被覆管熔融移動の非同時性の影響、集合体規模解析による高増殖炉心における軸ブランケット長の影響、燃料固化モデルの影響、簡易モデルによる燃料侵入長の評価、及び事故影響の炉容器内格納性について検討した。最後に、本研究で得られた主要な結論をまとめる。

2 ピン型燃料炭酸ガス炉の特徴と基本仕様

2.1 原子炉プラントの特徴

ガス炉は、冷却材ガスの中性子減速効果が小さく、ナトリウム炉に比較してスペクトルが硬くなるため、増殖性能向上のポテンシャルがある。

熱的性能に関しては、ガスの熱容量は小さく、熱伝導率も小さいため、熱輸送性の向上及び除熱性能確保のためには圧力を上げて密度を高める必要があり、高圧システムとなる。ピン型燃料では、フィンやリブなどの伝熱促進体による系の圧力損失とポンプ動力の増大は避けられない。また、除熱性能が低いことから、燃料被覆管の健全性を確保するため、出力密度を小さくする必要があり、炉心サイズが大型化する。ただし、ガス冷却材そのものは相変化がないため、二相流などの流動の複雑さを考慮することなく高温化が可能である。

構造健全の観点からは、ヘリウムは高温でも化学的に安定であるの対して炭酸ガスは高温で材料腐食の問題が生じる。一方、ガス冷却材は熱伝達率と熱容量が小さいことにより、サーマルストライピングや過渡変件事象等による構造物への熱荷重が小さい。高圧力化が要求されることと、炉心サイズが大型化するので、プレストレストコンクリート製圧力容器 (PCRVC) の採用が考えられ、一次系機器を一つのコンパートメントに収納できるためプラントの簡素化が可能である。

運転・保守性に関しては、ガス炉は水との共存性が良いため、ナトリウム炉の中間輸送系(2次系)を必要とせず、システム簡素化による運転・制御性が容易となり得る。また、ガスは透明であるため、保守の際の点検や検査、補修及び監視が容易である。冷却材は放射化されにくいので、冷却系機器などの保守・補修時の遮蔽等も少なく済むものと考えられるが、ストリーミング対策が必要である。

環境負荷特性の点では、ガス冷却材は放射化されにくいので、放射化するナトリウムのように冷却材周りに遮蔽体が必要になることはない。また、それ自身が廃棄物となることも考えられない。しかし、ナトリウムに比較して中性子反応断面積が小さいため、炉心周囲の高速中性子フルエンスは大きく、炉心周囲構造物の放射化は遮蔽体の設置も含めて注意が必要である。

経済性については、冷却材は化学的に不活性であるため、水・蒸気との共存性が良く中間輸送系を削除でき、さらに予熱系や燃料取扱系の洗浄系も削除できる。また、制御棒を下部挿入とし、燃料交換装置にマニピュレータを採用した場合には、回転プラグ等の上部構造物が削除できるため、炉心サイズが多少大きくなっても経済性の向上が期待できる。また、開発コストという点では、ピン型燃料炭酸ガス炉の場合にはプラントシステムに AGR 技術、燃料集合体にナトリウム炉技術などが利用でき、開発要素は比較的少ない。

2.2 安全上の特徴

ガス炉では、冷却材は单相流で相変化がないので、ナトリウムのようなボイド形成による反応度挿入機構がない。したがって、CDA における反応度挿入機構は、被覆管溶融移動反応度及び燃料移動反応度のみである。また、炉心損傷時にナトリウム炉で見られる燃料-冷却材相互作用 (FCI: Fuel Coolant Interaction) も発生しない。ガス冷却材の小さな熱容量に対して炉心での冷却材速度を許容できる程度に抑えるため、ガ

ス炉では燃料ピンの配列ピッチをナトリウム炉と比して約3倍広くしている。したがって、冷却材流路がCDA時の有効な燃料流出経路となり、燃料の下部軸ブランケット(LAB)への侵入・溶融貫通・流出の可能性が高い。

デブリ冷却性確保に関して、ナトリウム炉と比べて除熱性能の劣るガス炉では、下部プレナムに堆積した溶融燃料の長期安定冷却を可能とするコアキャッチャー等の設備が必要となる。

水や構造物、格納容器雰囲気との反応性が小さいため、バウダリ破損時であっても急激な化学反応によるエネルギー放出には繋がりにくく安全性が高い。しかし、自然循環による熱除去能力が小さいため、減圧事故時の強制循環冷却機能の信頼性を確保するための十分な対策、検討が必要である。

2.3 基本仕様

ガス冷却高速増殖炉は、炭酸ガスを冷却材とし、ピン型燃料を採用した密封型金属被覆のMOX燃料を使用する。基本仕様を表1 [2] にまとめた。熱出力は360万kWで電気出力は約140万kWであり、4ループ構成となっている。原子炉構造概念図を図1 [2] に示す。炉心上部機構はなく、制御棒は下部駆動としており、燃料交換は炉上部の燃料交換機のみで行うこととしている。

リファレンス炉心配置を図2 [2] に示す。炉心サイズは、炉心径/高さが4.8m/1.5mである。また、軸ブランケットは上下に設け、径ブランケットは2列となっている。燃料集合体形式はラッパ管付き六角集合体で、燃焼度は欧州先行炉設計に準じて12万MWd/tと設定し、増殖比は1.06となる。なお、増殖比1.26の高増殖炉心及び燃焼度15万MWd/tの炉心も検討している。

3 解析条件

3.1 解析体系及び条件

3.1.1 解析体系

本解析では、図3に示すように5×50の2次元円柱体系で解析を実施した。炉心部は軸方向に15分割しており、メッシュサイズは10cmにしている。一方、径方向には、内側炉心3メッシュ、外側炉心1メッシュ、径ブランケット1メッシュと粗い体系となっている。ただし、中性子束計算に用いたメッシュは29×57として十分に小さなメッシュとした。径方向メッシュサイズは当該集合体の面積を円筒形状に換算した。解析体系では、燃料集合体はエントランスノズル部からリフティングヘッド部までを表しており、その上部には10mのガス層を設けている。実際のエントランスノズル及びグリッドスペーサのような複雑な構造物や制御棒集合体のモデル化は考慮していない。ただし、エントランスノズル部ではオリフィス係数を調整することにより入口圧損を模擬した。

3.1.2 幾何形状データ

表2は、本解析で用いたリファレンス炉心における燃料ピン及びラッパ管の構造物の幾何形状データを示している。表には高増殖炉心の軸ブランケット長も併せて示している。燃料ピンは、炉心部150cm、上下軸ブランケット部10cmとなっており、LABが短くなっているため、熔融燃料が固化・閉塞しにくく再臨界回避に有効である。軸ブランケットとガスプレナムを支持するためのインシュレータペレットを考慮しているが、解析上は被覆管の一部としてモデル化した。

本解析では、SIMMER-IIIの最新バージョンであるversion 2.Gを用いた。入力データの詳細な作成方法は付録Aに示している。また、全炉心解析で用いた入力データを付録Bに示す。

解析上、インシュレータペレットを支持する上下のピンが破損した場合には、インシュレータペレットを強制的に破損させた。本解析で用いたコレクションセットを付録Cに示す。

3.1.3 被覆管及び燃料の熔融破損判定

被覆管の破損条件には熔融割合1.0を用いた。これは被覆管温度がliquidus温度に到達したら被覆管を液体スチールへ移行させ、ピン束表面を液膜として移動させるように設定した。ここで、熔融割合とは熔融潜熱に対するsolidusエネルギーとの差で表す。

ガス炉では高エネルギー条件で瞬時に燃料が熔融移動すると予想されるので、燃料の破損条件には熔融割合0.8を用いた。また、燃焼末期炉心の燃料ペレット内には粒内・粒界にFPガスが含まれており、これは燃料熔融後あるいはペレット破損後に放出し燃料分散の駆動力となる。本解析で用いたFPガス含有率は、典型的な高速炉で用いられたもので、炉心部で約 3.6×10^{-3} g/g-fuel、ブランケット部で約 2.7×10^{-3} g/g-fuelとした。

3.1.4 燃料の固化及び変形・崩壊

CDAにおいて燃料流出経路として上下軸ブランケット領域のピン束流路があるが、融体から被覆管への熱損失と融体の固化に伴う流動性の低下によって燃料の固化・閉塞が形成される。本体系では、ナトリウム炉に比して水力等価直径が大きい(約12mm)ので、閉塞が形成されづらく再臨界回避に極めて有効な燃料流出経路であると考えられる。燃料の固化モデルとしては、これまで Bulk freezing model [11] が用いられてきたが、融体侵入長を実験値に対してかなり保守側に評価することが知られている。一方、サイクル機構で開発された Fuel caps freezing model [12] はスチール円管に対する融体侵入長を適正に評価できる [13]。そこで、ここでは、後者の固化モデルをベースに燃料の侵入挙動を評価した。

SIMMER-III では、燃料ピンは下部に支持する構造物がなくなると崩壊して燃料粒子に移行するが、このときの粒子サイズはペレットと同程度と考えられるため、ペレットの半径を入力として与えた。

SIMMER-III は炉心の軸方向熱膨張を模擬できないため、これによる負のフィードバックを無視することとなる。これは反応度印加量を過大に評価することになるが、被覆管の溶融移動による反応度挿入量は十分に大きいため、即発臨界を超過するという結果は変わらない。

3.1.5 核計算

核データとして ABBN 型の無限希釈断面積 (ISOTXS ファイル) と自己遮蔽因子 (BRKOXS ファイル) を入力とする。これらは JENDL3.2 ベースの 70 群基本核データライブラリ JFS3-J3 を基に、18 群に縮約したものである。Sn 輸送理論に基づいた中性子束計算には TWODANT モデルを使用した。

3.2 定常計算により求めた初期及び境界条件

SIMMER-III の核計算モデルで求めた出力密度分布を用いて、SIMMER-III の流体力学計算部により、適当な初期及び境界条件を得るように 30 秒間の定常計算を実施した。その際、炉心圧力が 42bar 程度で総質量流量が約 11900kg/s となるように上下部境界における圧力を決めた。また、現在の設計作業は出力流量比分布を与えるまで進んでいないため、ここでは典型的な高速炉の平衡末期炉心における出力流量比となるようにエントランスノズル部におけるオリフィス係数により流量配分を調整した。これらの定常計算で得られた各メッシュにおける物理量を過渡計算の初期値として与えた。詳細は付録 D に示す。

3.3 過渡条件

過渡計算では、流量半減時間 4.4s と想定し、入口境界圧力を変化させて ULOF を模擬した。圧力はピン束部における圧力損失により流量の 1.75 乗に比例すると仮定して求めた。表 3 に示す入口境界の圧力履歴を入力として与えた。

4 ULOF 事象推移の解析結果

4.1 LOF 開始初期

図4及び図5は、体系を径方向に5分割したリング毎の質量流量及び冷却材流速をそれぞれ示す。図中の*i*は径方向メッシュ位置（リング番号）、*j*は軸方向メッシュ位置を表している。流量半減時間4.4sで減少した質量流量は、第1リングで被覆管が熔融破損する時刻 $t=17.6s$ で初期値の1/5程度まで減少している。また、冷却材流速は、第1リングの場合 $t=17.6s$ で47.9m/sから減少するが16.5m/sと依然として速いままである。

4.2 反応度過渡変化

反応度及び規格化出力の履歴を図6に示す。また、上部遮蔽体からエントランスノズルまでの体系全体の物質分布を図7に示す。図6を見ると、 $t=20s$ 付近で再臨界による出力バーストが発生しているが、その後は徐々に低下している。

4.2.1 出力バースト前

バースト付近の反応度履歴を拡大したものを図8に示す。図中には燃料及びスチールの炉心内の質量履歴も併せて示している。図7より、被覆管は $t=17.6s$ で第1リングのmidplane付近から熔融するが、冷却材流速が16.5m/sと速いため、熔融した被覆管はピン束表面に液膜を形成しながら上部遮蔽体まで移動する。その後、徐々に被覆管熔融は軸方向に拡大し、図8に示すように反応度が上昇し始める。このとき、反応度履歴は炉心内のスチールの質量履歴によく対応していることが分かる。 $t=19.6s$ に第2リングのmidplane付近の被覆管が溶け始める。それに伴い、反応度上昇が加速される。

4.2.2 出力バースト

被覆管はmidplaneから徐々に熔融・移動していき、ついに $t=19.75s$ に反応度は1\$に到達する(図8)。このように、ガス炉では、ドップラー以外の負の反応度効果がなく、また、ナトリウム炉のように冷却材のポイド化による反応度挿入がないため、定格出力が維持された状態で、スチール熔融移動という比較的大きな反応度変化速度をもつ事象から起因過程のバーストが始まる。出力バーストは、図6に示すように134Poで、反応度のピークは1.0\$、反応度挿入率は約5.8\$/s、積算出力は約4.2FPSであった。図9の第1リングのmidplaneにおける燃料及びスチールの温度履歴より燃料ペレットが $t=19.75s$ から急加熱され、出力ピーク時に燃料は未破損であることから、この出力バーストはドップラー効果による負の反応度フィードバックのみによって収まったと言える。

燃料ペレットは出力ピークより若干遅れて $t=19.78s$ に第1リングのmidplane付近で熔融する。このときの燃料温度は一時的に約3110Kまで上昇する(図9)。熔融燃料が冷却材流路へ放出され、存在していたガス冷却材を取り囲むことにより、流路内のガスが急速に加熱され、1100Kから3050Kまでガス温度は上昇する。これに加えてFPガスも噴出することにより、midplaneにおける流路のガス圧力は図10に示すように3.8MPaから9.5MPa程度まで急に上昇する。この圧力が燃料を上下方向に分散させる駆動力となり、反応度を1\$近傍から急激に低下させる。ところで、この炉心圧力発

生は炉心上部構造物（UCS）をミサイル化して上部プレナムへ飛び出させる可能性があり、設計対応が必要である。バースト末期の第1リングにおける炉心燃料は midplane 付近で約 3040K で、液体と粒子が混合した状態となる。図 11 の圧力の軸方向分布を見れば、燃料を分散させる駆動力となった圧力はしだいに緩和され、バースト直後に上下に分散した燃料は Fissile 上下端に粒子として堆積する。その後、炉心上部には、比較的大きな圧損（上部遮蔽体）があるため、上部ブランケット（UAB）付近に燃料堆積が形成されるのに対して、炉心下部では、12mm という比較的大きな水力等価直径をもつ下部プレナムがあるので、燃料は主に下方へ移動している。

4.2.3 出力バースト後

第2及び第3リングの燃料及びスチールの温度をそれぞれ図 12 及び図 13 に示す。出力バーストにより、燃料ペレット温度は第2リング及び第3リングともに midplane 付近で融点近傍の 3000K 程度まで上昇している。第2リングの被覆管は徐々に熔融移動することにより、反応度は若干上昇する。それにより、 $t=20.33s$ に第2リングが破損する。第1リングと同様に、流路内で圧力を発生させ、燃料を上下方向へ分散させる。

図 14 及び図 15 には積算出力と炉心内燃料平均温度を示す。出力バーストにより約 4.2FPS のエネルギーが投入され、炉心内の燃料平均温度は急に 500K 程度上昇する。エネルギーが投入されるため、炉心内の燃料温度は上昇するが、ラップ管などに熱を奪われるため、徐々に温度は下降する。炉心内 Fissile 燃料及びスチールの質量履歴をそれぞれ図 16 及び図 17 に示す。第1及び第2リングともに燃料破損後に炉心外へ流出しているが、 $t=22.3s$ で第1リングの質量が増加している。これは第1-第2リング間のラップ管破損が起これ、第2リングの燃料及びスチールは第1リングへ移動したためである。同様に、 $t=22.5s$ においても第2-第3リング間のラップ管熔融貫通後、第2リングの燃料が第3リングへ移動したため、第3リングの燃料質量が増加した。

4.3 計算終了時の炉心最終状態

図 18 に示すように、熔融燃料は主に流動抵抗の小さな下方へ分布し、 $t=40s$ で 25% 程度の燃料流出となり、十分に未臨界条件に達する。ガス炉では、ナトリウム炉で見られたような FCI に駆動された径方向スロッシングなどが生じないため、以後、厳しい再臨界が生じるとは考えられない。

5 解析結果の考察・検討

本解析は、図3に示すように炉心を径方向に4分割する比較的粗いメッシュ体系で解析しており、実際の事象進展に比べると複数の集合体が斉時的に被覆管が溶融するので、被覆管溶融移動による反応度挿入率を過大に評価している可能性がある。そこで、5.1節において出力流量比(P/F)分布を考慮して被覆管溶融移動の非同時性の影響を検討した。5.2節においては、高増殖炉心概念における軸ブランケット長が長い場合のLABにおける燃料固化挙動を集合体規模で解析し検討した。ガス炉では、LABにおける燃料の固化・閉塞が再臨界の発生に大きく影響を及ぼすと予想されるので、5.3節にて燃料固化モデルの影響を調べた。5.4節においては、簡易モデルによる融体侵入長を評価した。最後に、ガス炉における事故影響の炉容器内格納性について考察した。

5.1 被覆管溶融移動の非同時性の影響

ULOF事象の起因過程では、被覆管及び燃料の溶融破損、移動という現象は、各燃料集合体における出力、流量、燃焼度などの特性の相違があるため、時間的に同時に発生することはない。この非同時性によって、P/F値の高い集合体は先行的に被覆管溶融を生じ、反応度挿入に寄与することになる。ここでは、P/F分布を考慮して被覆管溶融移動の非同時性の影響を調べる。

5.1.1 非同時性を考慮した反応度挿入率

まず、全炉心解析で用いた各リングのP/F値(1.13, 1.09, 1.01, 0.92, 0.8)に対する被覆管温度上昇率を典型的な高速炉における平衡末期炉心におけるP/F値に対して内外挿することによって、各P/F値の被覆管温度上昇率が得られる。ただし、これは定格出力からの温度上昇率である。これらを用いて被覆管溶融移動開始時間を見積もる。次に、静的核計算により各P/F値の1集合体当りの反応度変化率を求める。これらを積算すると、図19に示すような反応度履歴が得られ、定格出力の場合に0.60\$/sの反応度挿入率となる。このように全炉心解析で得られた反応度挿入率5.8\$/sの1/10程度となり、被覆管溶融移動の非同時性の影響は大きいと言える。4章で示した出力履歴では、約 $2P_0$ 程度まで徐々に出力が上昇しているため、図中には $2P_0$ と $3P_0$ の場合の履歴も示している。これより $3P_0$ を考慮しても、非同時性の影響は無視できないことが分かった。なお、算出方法の詳細は付録Eを参照されたい。

この非同時性の影響を調べるため、 $t=19.5s$ から炉心部における液体スチールと構造材間のドラッグを大きくすることにより、溶融被覆管の移動速度を1/10程度に低下させ、1\$直前の反応度挿入率を小さくさせた解析を実施した。

5.1.2 解析結果

図20は反応度及び規格化出力を示している。また、図21において反応度履歴を比較する。溶融被覆管の移動速度を低下させることによって反応度挿入率は1.4\$/s(約1/4)と低くなり、徐々に反応度は増加するが、0.9\$近傍でドップラーによるフィードバックによって増加しなくなる。その後、反応度はそのまま推移し、 $t=20.0s$ で燃料は溶融破損する。このとき、反応度は0.91\$で即発臨界とはならず、出力も $27P_0$ と小

さい。図 22 に物質分布を示す。4 章で示した解析結果と同様に、燃料破損後に 7MPa 程度の圧力を発生し上下に分散するが、その後燃料は主に下方へ移動する。図 23 に第 1 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度を示す。また、図 24 で積算出力を比較する。 $t=19.7s$ から徐々に反応度が上昇するため、燃料ペレット内部温度もやや緩やかに上昇し、 $t=20s$ 付近で融点に到達し、破損する。図を見ると、非同時性を考慮したケースはエネルギー上昇率が小さくなっているが、燃料破損時の投入エネルギーは同程度である。図 25 及び図 26 に燃料の質量履歴を示す。燃料破損後、熔融燃料は継続的に炉心外へ流出し、 $t=40s$ で約 25%の燃料が流出した。

この解析結果より、被覆管熔融移動の非同時性を考慮した反応度挿入率が小さい場合でも、印加された反応度が燃料の温度上昇と分散によって補償されるまでエネルギーが投入されることになるため、最終的には燃料が可動性を得て炉心外へ流出することが可能になると言える。

5.2 高増殖炉心における軸ブランケット長の影響（集合体規模解析）

高増殖炉心における軸ブランケット長の燃料流出挙動に及ぼす影響を調べるため、炉心中心部の集合体を対象とした 1 次元解析を行った。解析は、全炉心解析と同様に 30 秒の定常計算で入口側オリフィス係数の調整を行った後、初期・境界条件を設定し、流量半減時間 4.4s で過渡計算を実施した。また、出力履歴は先の全炉心解析で示したものを時間テーブルで与えた（図 27）。これより投入されたエネルギーの履歴は図 28 ようになる。パラメータは軸ブランケット長で、リファレンス炉心の上下軸ブランケット長 10cm/10cm に対して高増殖炉心の 30cm/50cm に拡張したケースである。

リファレンス炉心及び高増殖炉心の物質分布をそれぞれ図 29 及び図 30 に示す。図 29 を見ると、リファレンス炉心における燃料流出挙動は、先の全炉心解析と同様に、燃料破損直後に流路ガスの急加熱及び FP ガス放出により燃料は上下方向に分散後、550K 程度の LAB をも溶かし込み、下方へ有効に移動する。一方、図 30 を見ると、LAB は熱容量が大きいため熔融されなかったが、高増殖炉心においても、燃料破損直後の発生圧力により燃料は上下方向に分散した後に下方へ移動し、十分に燃料が流出される。

リファレンス炉心及び高増殖炉心における Fissile 燃料の質量履歴をそれぞれ図 31 及び図 32 に示す。グリッドスペーサ等による圧損を考慮せず、かつ燃料固化モデルに Fuel caps freezing model を用いた場合、両ケースともに燃料破損後の炉心内の燃料は有効に炉心外へ流出されることが示された。

5.3 燃料固化モデルの影響

ガス炉では、LAB における燃料の固化・閉塞が再臨界の発生に大きく影響を及ぼすと考えられる。ここでは、燃料固化モデルの影響を調べるため、今回使用した Fuel caps freezing model と従来型の Bulk freezing model の固化・閉塞挙動の比較を全炉心解析及び集合体規模解析により実施した。

5.3.1 全炉心解析

4章と同様の全炉心解析を Bulk freezing model を用いて実施した結果として、反応度及び規格化出力を図 33 に示す。出力バースト後、燃料は溶融し、分散することによって反応度は緩やかに低下していく。第 3 リングが破損する $t=33s$ 付近で反応度は大きく低下し、十分に未臨界に達する。図 34 は反応度履歴を比較したもので、図中の丸印は燃料破損時間を表している。Bulk freezing model を用いたケースでは、溶融燃料が軸ブランケット部において固化しやすくなったため、燃料分散による反応度降下が小さくなった。それにより、第 2 リングの燃料が早期に破損し、出力バースト後の反応度は 0S 近傍を推移した。図 35 は物質分布を示す。Fuel caps freezing model を用いた場合(図 7)の溶融燃料は LAB で全く閉塞を起こさず、流出した。一方、Bulk freezing model を用いた場合は $t=23s$ を過ぎてから第 1 リング、第 2 リングともに LAB で閉塞を起こしている。 $t=31s$ を過ぎると、第 1 リングでは高温になった燃料が可動性を持ち下方へ移動する。第 2 リングの燃料は第 1 リングを燃料流出経路として炉心外へ流出する。次に、図 36 で積算出力を比較してみると、Bulk freezing model を用いた場合は燃料分散によって反応度がさほど低下しなかったため、エネルギーが $t=22s$ 付近で高くなっているが、その後はほぼ一致している。図 37 は Fissile 燃料の質量履歴を示す。第 3 リングが溶融・分散したため、 $t=40s$ で 40% 近い燃料流出量となった。

5.3.2 集合体規模解析

5.2 節と同様の集合体規模解析を、Bulk freezing model を用いて行った。リファレンス炉心及び高増殖炉心における物質分布をそれぞれ図 38 及び図 39 に示す。同モデルにより、両図ともに Fissile 上下端に燃料の閉塞が形成されている。溶融燃料は破損後に上下方向へ分散するが、その後重力により下方へ移動している。ただし、途中で上方向へ移動している(図 38 の $t=24s$ 付近)ことがあるが、これは計算上の圧力一定下側境界条件により冷却材が突然上方向へ流れることがあるためである。

リファレンス炉心及び高増殖炉心における Fissile 燃料の質量履歴をそれぞれ図 40 及び図 41 に示す。図 40 を見ると、リファレンス炉心の場合における炉心外への燃料流出量は約 60% であるのに対して、高増殖炉心の場合は約 40% であり、Bulk freezing model を用いた場合は軸ブランケット長の影響は明瞭となった。

5.4 簡易モデルによる融体侵入長の評価

5.4.1 これまでの実験結果と簡易モデルによる予測値との比較

燃料流出挙動を調べた代表的な炉外実験 [14] には、 UO_2 -steel 系の単管流路の Geyser 試験 (CEA Grenoble)、Blokker 試験 (JRC Ispra) 及び UO_2/Mo -steel 系の単管流路の SMPR 試験 (UKAEA Winfrith) が挙げられる。そのほかに、ピン束内の固化挙動を調べた ANL Spencer の実験 (燃料-スチール系の 7 本ピン束体系) が挙げられる。一方、理論式には、単管流路の簡易モデルとしてよく知られた Bulk freezing model [11] があるが、これは融体侵入長を過小評価することが知られている [13]。ここでは、融体の固化挙動を微視的物理解メカニズムに基づいた Fuel caps freezing model で簡易評価を行う。

Bulk freezing model と同様に、同モデルを簡略化した形に表すと、融体侵入長 Z_p は次式で表される。

$$Z_p = \frac{\rho_l D_h V}{4h_l} \left\{ C_1 \ln \frac{T_{i0} - T_{lfw}}{T_{liq} - T_{lfw}} + \frac{\theta L_f}{T_{liq} - T_{lfw}} \right\} \quad (1)$$

上式は過冷却温度 T_{lfw} で大きく左右され、 UO_2 -steel 系の単管流路における固化実験では、 $T_{lfw}=2940K$ と評価されている。なお、式中の熱伝達係数 h_l は Dittus-Boelter の相関式で次式で表される。

$$h_l = \frac{K_l}{D_h} \left\{ 5 + 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \right\} \quad (2)$$

表4の物性値を使って融体侵入長を評価する。表5は上記で挙げた実験の条件及び得られた融体侵入長 ($Z_{p_exp.}$) を示す。また、式(1)で予測された融体侵入長 (Z_{p_model}) も併せて示している。図42は予測値と実験結果を比較したものである。予測値は実験結果のばらつきのおおむね平均値を与えており、Fuel caps freezing model は融体侵入長を $\pm 50\%$ 以内で予測できることが分かった。実機のピン束における固化現象は、被覆管が溶融して融体に混合し、被覆管が溶融し燃料のエンタルピを低下させるとともに、ブランケット燃料粒子が流動抵抗を増大させるため、単管流路における固化・閉塞とは挙動が異なるが、融体侵入長は式(1)により概略評価ができると仮定して以下の検討を行う。ピン束流路の固化実験はデータ数が少ないため、実験データの拡充が望まれる。

5.4.2 ガス炉における融体侵入長

提案されているガス炉のリファレンス炉心はピンピッチが大きく水力等価直径が約12mmと大きい。このような幅広いピン束流路への融体侵入長を簡易モデルで予測する。パラメータは水力等価直径、融体温度、融体速度である。MOX燃料とsteel壁が接触したときの壁表面の過冷却層における温度は $T_{lfw}=2860K$ を使用した。これは上記の UO_2 燃料における融点と過冷却温度との差 $T_{liq}-T_{lfw}=180K$ を用いたものである。パラメータである融体温度及び融体速度は、全炉心解析で見られた典型的な値である3100K及び3m/sを基準値 (Case1) とした。

ガス炉における融体侵入長の参考のための予測値を表6に示す。Case1における融体侵入長は2.0mで、これまで全炉心及び集合体規模解析で示したように、溶融燃料は十分に流出できることを示している。表中には、水力等価直径10mm、融体温度3050K、融体速度0.3m/sの場合の融体侵入長 (Case2-6) も参考のために示している。Case2~6でも融体侵入長は70cmを超え、この範囲内では軸ブランケット長50cmの高増殖炉心においても燃料流出が期待できる。

5.4.3 水力等価直径と融体侵入長との関係

ガス炉は水力等価直径が広いことが特徴であったが、炉心性能を上げるために水力等価直径を狭くすることが検討されている。そこで、水力等価直径に対する簡易モデルで予測される融体侵入長を整理した (図43)。初期融体温度は3100Kとし、初期融体速度 (0.3, 3m/s) をパラメータとした。また、図中のエラーバーは前節における予測値と実験結果との比較に基づいた $\pm 50\%$ の固化モデルによる不確定性幅を示している。

水力等価直径を12mmから8mmへ変化させると融体侵入長は50cm (融体速度0.3m/sの場合) も短くなることが予測され、ピンピッチの影響は非常に大きい。水力等価直径10mm前後を見ると、0.3m/sの侵入速度を考えても40cmを越えるものと予想さ

れる。ただし、実際の炉心では、燃料流出経路に流動抵抗となるグリッドスペーサ等があり、またピン束流路における固化実験データが少ないことを考慮して、現時点では融体侵入長の評価にあたって十分な保守性を確保する必要がある。したがって、LAB が 40cm の炉心概念を現時点で設計する場合は、再臨界回避方策として軸ブランケット一部削除 (ABLE) 型燃料集合体を採用すべきである。

5.5 事故影響の炉容器内格納性

以上の解析・検討の結果、ガス炉の CDA 事象進展は、スラグインパクトの作動流体としての液体冷却材が存在しない上にもともと高圧系なので圧力上昇も影響しないため、燃料破損直後に炉心内の圧力レベルが過大になる場合に UCS のミサイル化が適切に抑制されれば、炉容器の機械的負荷が生じることなく、熱的な負荷が炉容器破損の主な要因になる。解析結果から、炉心で生成された熔融燃料はほぼ全量が下部プレナムへ早期に移行すると考えられる。したがって、ガスの低冷却性から、これらの熔融燃料を炉容器内で保持するためには、能動的な冷却系を備えたコアキャッチャーが必須であると考えられる。なお、コアキャッチャーを設計する際、炉心燃料の再配置による再臨界の発生を防ぎ、未臨界状態を長期に維持するため、幾何形状等を工夫する必要がある。

6 結論

実用化戦略調査研究の第1期における候補概念の一つであるピン型 MOX 燃料炭酸ガス冷却炉の CDA 評価を SIMMER-III コードにより実施した。本研究の目的は、ガス炉における CDA 事象推移とその特性を把握するとともに実用化戦略調査研究の安全要求の一つである再臨界回避方策の有効性・必要性を判断することである。本研究では、定格出力状態から短時間に炉心損傷に至る代表的な事象として ATWS 事象を選定し、その中で代表的な ULOF 事象を対象として事象推移解析を実施した。また、P/F 分布を考慮した被覆管溶融移動の非同時性の影響、軸ブランケット長が長い場合の燃料固化挙動、簡易モデルによる融体侵入長の評価、及び事故影響の炉容器内格納性についても検討した。

本解析により得られた事象推移は次のとおりである。ULOF 開始後、炉心中央部から溶融した被覆管は冷却材の流れにより上方向へ移動する。この炉心からの被覆管除去によって即発臨界を超過し、出力バーストが発生する。このときの反応度のピークはドップラーによる負の反応度効果により収まる。燃料破損直後、溶融燃料が流路中の冷却材ガスを巻き込み加熱すること、また崩壊した燃料から FP ガスが放出されることにより炉心部の圧力が高まる。これによって溶融燃料は一旦上下方向へ移動した後、主として流動抵抗の小さな下方へ移動・流出することにより、反応度は十分な未臨界状態に静定する。この事象推移は、被覆管溶融移動の非同時性を考慮して反応度挿入率を低下させても定性的には変わらない。

ガス炉では、被覆管溶融移動のみによって反応度印加を生じるため、これを緩和する方策はない。ただし、再臨界が発生したとしても、スラグインパクトの作動流体としての液体冷却材が存在しないため、炉容器バウンダリへの機械的負荷はきわめて小さい。一方、燃料破損直後に炉心圧力レベルが過大になる場合には、UCS がミサイル化して上部プレナムへ飛び出す可能性があり、設計対応が必要であると考えられる。

本解析対象とした設計では、LAB が 10cm と短いため、一旦燃料が溶融すれば、大量の溶融燃料が炉心から幅広いピンピッチを持つピン束流路を通して流出する可能性が高く、内部ダクト付き燃料集合体、ABLE 型燃料集合体等の再臨界回避方策は不要である。一方で、高増殖比を目標として 40cm 程度の LAB を採用する場合、燃料固化モデルの不確定性及び流路内のグリッドスペーサなどの熱・流動抵抗を考慮すると、通常燃料集合体では炉心外への大量の燃料流出は困難であると考えられる。ただし、再臨界回避方策の一つである ABLE 型燃料集合体によって再臨界排除は可能であると考えられる。

現時点の評価では、熱的な負荷が炉容器破損の主な原因となると考えられるため、事故影響の炉内格納を達成するためには、能動的な冷却系を備えたコアキャッチャーが必須であると考えられる。なお、コアキャッチャーを設計する際、炉心燃料の再配置による再臨界発生を防ぐため、幾何形状等を工夫する必要がある。

記号表

h	: Heat transfer coefficient (HTC) [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$].
D_h	: Hydraulic diameter [m].
κ	: Thermal conductivity [$\text{W}/\text{m}/\text{K}$].
C	: Specific heat [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$].
ρ	: Density [kg/m^3].
L_f	: Latent heat for fusion [J/kg].
T	: Temperature [K].
V	: Velocity of liquid fuel [m/s].
Z_p	: Penetration length [m].
θ	: Fractional latent heat (= volume fraction of solid particles in liquid).
Pr	: Prandtl number.
Re	: Reynolds number.

Subscripts

0	: Initial value.
l	: Liquid fuel.
liq	: Liquidus point.
w	: Wall.
l/w	: Supercooled liquid layer.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、システム技術開発部 リスク評価技術開発グループ 丹羽 元グループリーダー、FBR システムグループ 神山 健司 副主任研究員、要素技術開発部 高速炉安全工学グループ 近藤 悟 グループリーダー、佐藤 一憲 サブリーダーには、解析の準備、結果の検討、報告書の作成に至るまで技術的なご指導、ご協力を頂きました。また、SIMMER-III コードによる解析に当っては、原子力システム(株) 水野 正弘 氏にご協力を頂きました。深く感謝の意を表する次第です。

参考文献

1. 早船浩樹 他, “実用化戦略調査研究 (FBR プラント) 平成 10 年度予備調査 ー幅広い技術選択肢の検討ー,” JNC TN9400 99-080 (October 1999).
2. 三原隆嗣 他, “FBR システム技術検討書 ー平成 11 年度報告ー,” JNC TY9400 2000-024 (June 2000).
3. 小林順 他, “ガス冷却炉の検討,” JNC TN9400 2000-073 (June 2000).
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 (October 1999).
5. 遠藤寛 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 (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 (October 1999).
6. 藤田朋子, “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,” JNC TN9400 2000-038 (April 2000).
7. W. B. Kemmish, et al., “The Safety of CO₂ Cooled Breeder Reactors Based on Existing Gas Cooled Reactor Technology,” Progress in Nuclear Energy, Vol. 10, No. 1, pp. 1-17, (1982).
8. A. M. Tentner, et al., “The SAS4A LMFBR Whole Core Accident Analysis Code,” Proc. Int. Mtg. on Fast Reactor Safety, Knoxville, Tennessee, Vol. 2, pp. 998 (April 1985).
9. Sa. Kondo, et al., “Current Status and Validation of the SIMMER-III LMFR Safety Analysis Computer Code,” Proc. 7-th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-7249), Tokyo, Japan (April 1999).
10. Sa. Kondo, et al., “SIMMER-III: A Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis, - Version 2.H Model Summary and Program Description -, ” JNC TN9400 2001-002 (November 2000).
11. G. Berthoud, “Relocation of Molten Fuel: Determination of the Interfacial Resistance,” Proc. IAEA/IWGFR Technical Committee Meeting on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in Liquid Metal Fast Reactors, O-arai, Japan, pp. 331 (June 1994).
12. D. J. Brear, et al., “Modeling of fuel Freezing for Reactor Safety Analysis,” 日本原子力学会 1997 年秋の大会 予稿集, H57 (October 1997).
13. Sa. Kondo, et al., “Phase 2 Code Assessment of SIMMER-III, A Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis,” JNC TN9400 2000-105 (September 2000).
14. C. Le Rigoleur, et al., “Review of European Out-of-Pile Tests and Analyses of Molten Material Movement and Relocation and of Molten Material-Sodium Interaction,” Proc. IAEA/IWGFR Technical Committee Meeting on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in Liquid Metal Fast Reactors, O-arai, Japan, pp. 331 (June 1994).

表1 ピン型燃料炭酸ガス炉の基本仕様 [2]

No	項目	基本仕様
1	原子炉形式	ピン型燃料炭酸ガス冷却高速増殖炉
2	電気出力 (発電端)	約 1400MWe
3	熱出力	3600MWt
4	ループ数	4ループ
5	1次系 CO ₂ 温度	525℃
6	1次系圧力	4.2 MPa
7	タービン発電機	熱効率 38.9 %
8	プラント稼働率	90%以上
9	炉心・燃料	(U, Pu)O ₂
10	炉心の径/高さ	4.8m/1.5m
11	径ブランケット	2列
12	燃料形態	密封式ピン型MOX燃料
13	燃焼度 (増殖比)	12万 MWd/t (1.06) (15万 MWd/t についても検討中)
14	高増殖炉心	増殖比 1.26 を目標とする高増殖炉心の検討を継続中
15	平均炉心線出力	260W/cm
16	炉心出口温度	525℃
17	炉心圧損	0.275MPa (暫定)
18	被覆管最高温度	660℃ (暫定)
19	燃料集合体形式	ラッパー管付六角集合体
20	原子炉容器形式	PCR V
21	炉壁保護構造	断熱材+ライナ設置+水冷
22	1次系配管方式	シングルキャビティ方式
23	1次主循環ポンプ	単段吸込型 (2基/ループ)
24	蒸気発生器	蛇行コイル貫流型 (矩形ケーシング)
25	原子炉停止系	独立2系統-主炉停止系+後備炉停止系 (CSD, DSD+SASS)
26	炉心安全	①受動的炉停止方策: SASS 設置 ②再臨界回避方策: ボイド反応度の影響は非常に小さい。溶融燃料排出方策は未検討。コアキャッチャ設置。
27	炉心上部機構	なし (制御棒下部駆動、上部燃料交換)
28	補助炉心冷却系	独立4系統
29	原子炉格納施設	円筒形PCR V
30	プラント運転サイクル	344日5バッチ方式 (24ヶ月についても検討継続中)
31	燃料減衰待貯蔵	水プール貯蔵 (IVS 及び EVST での減衰なし)
32	炉内燃料交換	マニプレータ式燃料交換機
33	炉外燃料移送	燃料出入機 (台車式)
34	免震	—
35	プラント寿命	60年以上
36	原子炉建屋	原子炉建屋容積約 22万 m ³ /ユニット (ツインプラント)

表2 燃料ピン及びラッパ管の構造物の幾何形状データ

Items	Data for Reference core
Outer diameter of cladding	8.2 mm
Height of fuel pin	3.42 m
Height of core	1.5 m
Height of axial breeder (upper/lower)	0.1/0.1 m
Pitch of fuel pin	12.71 mm
Number of fuel pin per S/As	169
Height of S/As	6.57 m
Pitch of core component	180.61 mm
Width of wrapper tube (outer surface)	175.61 mm
Items	Data for High breeding core
Height of axial breeder (upper/lower)	0.3/0.5 m

表3 入口境界で与える圧力

No.	Time (s)	Pressure (Pa)
1	0	5.7000E+06
2	1	5.1292E+06
3	2	4.7886E+06
4	3	4.5679E+06
5	4	4.4162E+06
6	5	4.3070E+06
7	6	4.2256E+06
8	8	4.1141E+06
9	10	4.0430E+06
10	15	3.9463E+06
11	20	3.8996E+06
12	25	3.8732E+06
13	30	3.8568E+06
14	40	3.8382E+06
15	1000	3.8051E+06

表4 物性値

Symbol	Description	Steel	UO2	MOX
ρ	Density (kg/m ³)	7600	8860	9190
C	Specific heat (J/kg/K)	720	520	528
κ	Thermal conductivity (W/m/K)	9.735+ 0.01434T	3.1	3.1
L_f	Latent heat for fusion (J/kg)	-	277000	267000
μ	Viscosity (Pa s)	-	0.00434	0.0045
T_{liq}	Liquidus temperature (K)	1713	3120	3040

表5 簡易モデルにより予測された燃料侵入長と実験結果との比較

Test No.	Tube Diameter D_h (mm)	Initial Melt Temperature T_{l0} (K)	Initial Wall Temperature T_{w0} (K)	Initial Velocity V (m/s)	Z_{p_exp} (m)	Z_{p_model} (m)	Z_{p_model}/Z_{p_exp}
Geyser tests performed using pure UO ₂ in thick-walled steel tubes.							
Geyser 4	4.0	3270	293	3.2	0.60	0.61	1.02
Geyser 7	4.0	3270	1273*	4.1	0.75	0.65	0.87
Geyser 8	4.0	3270	1273*	4.0	0.48	0.65	1.34
Geyser 9	4.0	3270	293	1.8	0.47	0.52	1.11
Geyser 11	4.0	3270	293	1.9	0.80	0.53	0.66
Geyser 12	4.0	3270	293	3.0	1.00	0.60	0.60
Geyser 13	4.0	3270	293	1.7	0.45	0.51	1.14
Geyser 15	4.0	3270	293	3.3	0.73	0.62	0.84
Blokker tests performed using pure UO ₂ in circular and rectangular channels.							
Blokker 1	4.0	3270	673	3.6	0.4	0.63	1.57
Blokker 3	8.5	3270	673	5.3	2.00	1.74	0.87
Blokker 4	9.9	3270	673	7.4	2.00	2.26	1.13
Blokker 5	9.9	3270	673	3.3	1.50	1.89	1.26
SMPR tests performed using 80%UO ₂ /20%Mo thernite mixture in circular and rectangular channels.							
SMPR05 1	3.3	3600	293	3.3	0.166	0.30	1.78
SMPR05 2	3.3	3600	293	1.7	0.159	0.24	1.51
SMPR05 3	3.3	3600	293	1.4	0.179	0.22	1.25
SMPR05 4	3.3	3600	293	0.94	0.176	0.19	1.09
SMPR02-d1	3.3	3600	293	3.3	0.330	0.30	0.90
SMPR02-d2	4.7	3600	293	3.3	0.520	0.46	0.89
ANL Spencer tests performed using UO ₂ in 7-pin bundle.							
CRBR test#1	2.84	3470	1170	3.51	0.430	0.49	1.13
CRBR test#3	2.84	3470	570	2.62	0.340	0.45	1.32
CRBR test#6	2.84	3470	870	4.10	0.430	0.51	1.18

表6 ガス炉における燃料侵入長の参考予測値

Case No.	Tube Diameter D_h (mm)	Initial Melt Temperature T_{l0} (K)	Initial Wall Temperature T_{w0} (K)	Initial Velocity V (m/s)	Z_{p_model} (m)
Case 1	12.0	3100	700	3	2.00
Case 2	12.0	3050	700	3	1.76
Case 3	12.0	3100	700	0.3	1.09
Case 4	12.0	3050	700	0.3	0.96
Case 5	10.0	3100	700	0.3	0.85
Case 6	10.0	3050	700	0.3	0.75

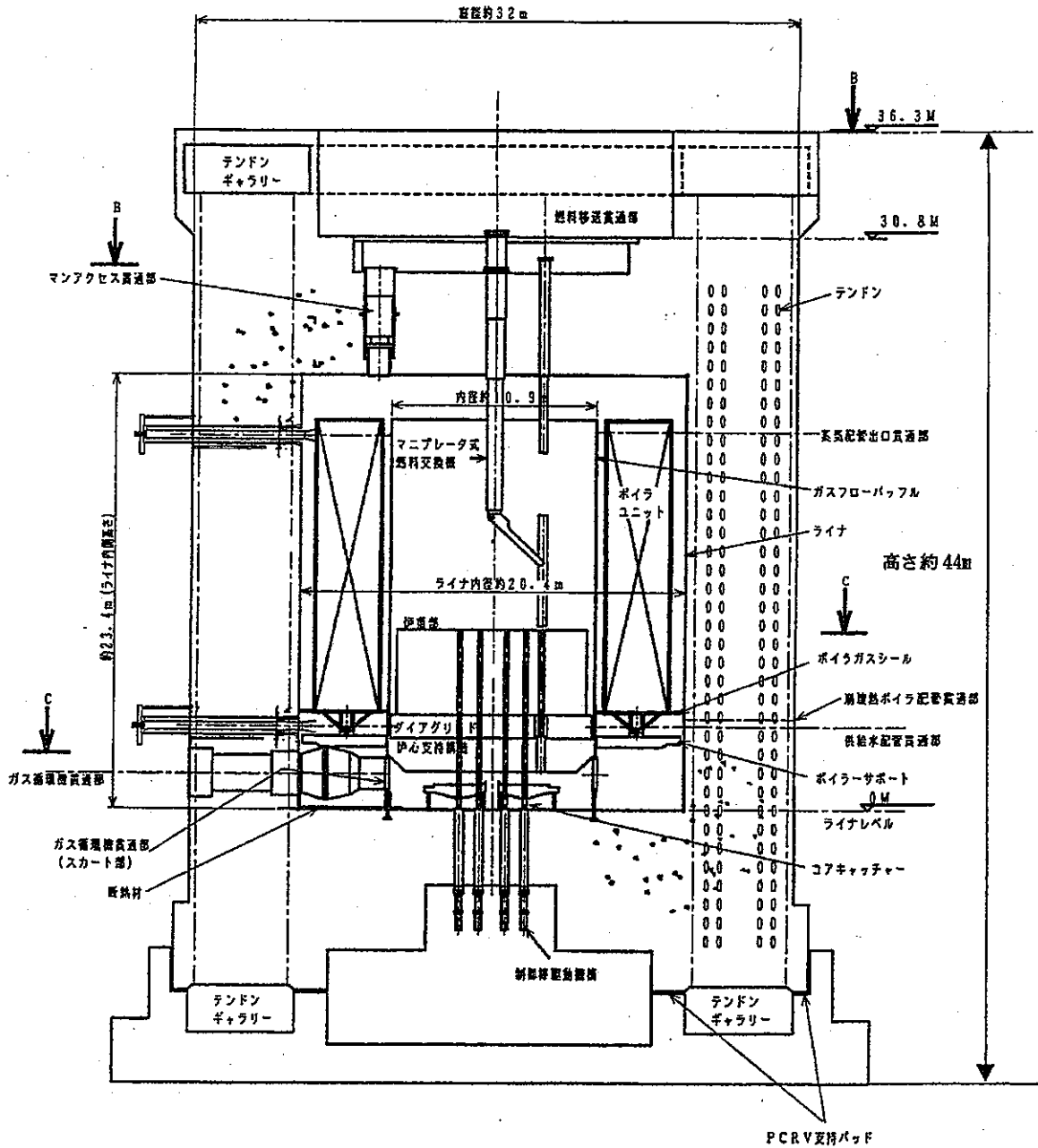


図1 ピン型燃料炭酸ガス炉の原子炉構造図 [2]

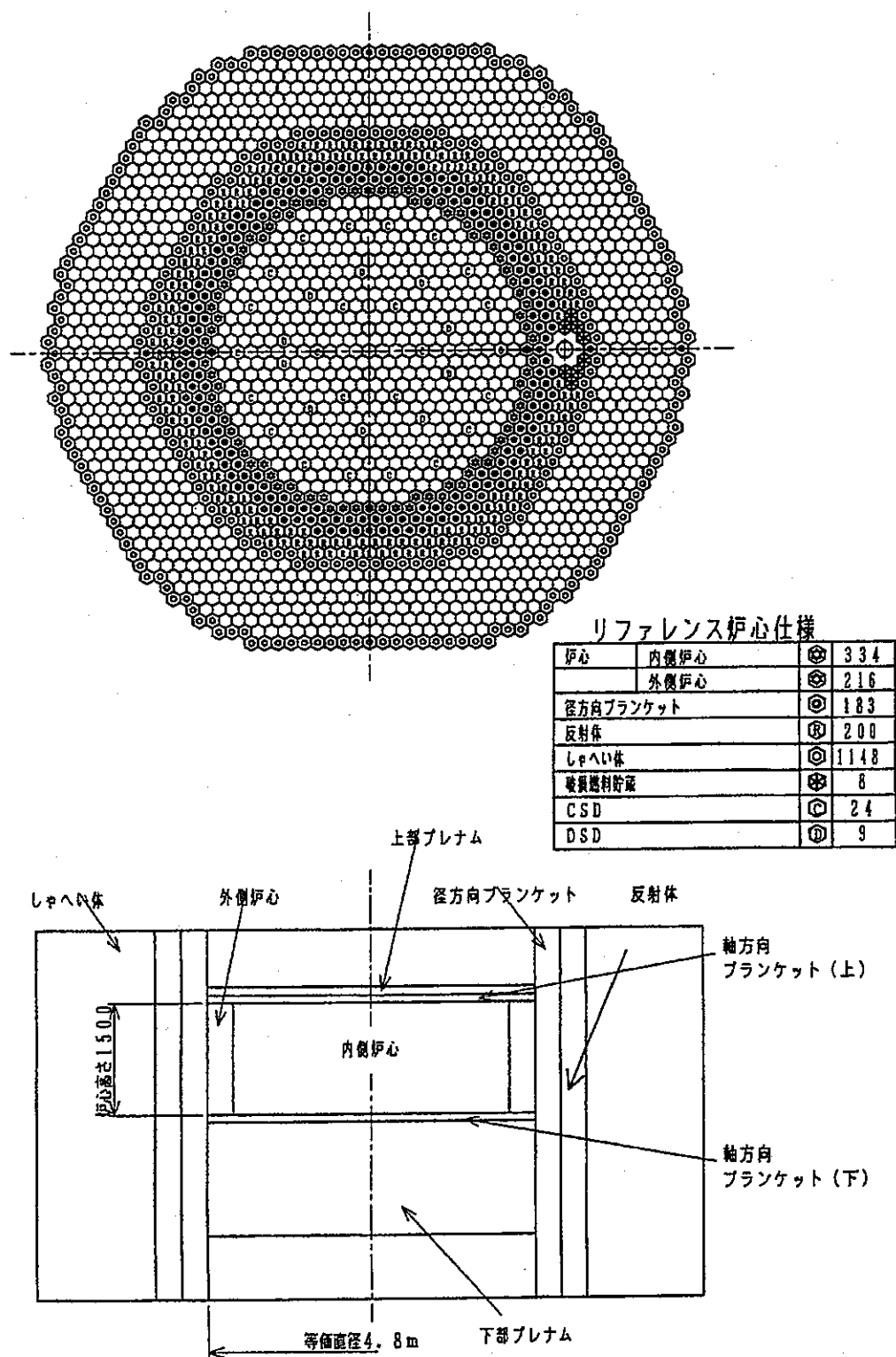


図2 ピン型燃料炭酸ガス炉のリファレンス炉心配置 [2]

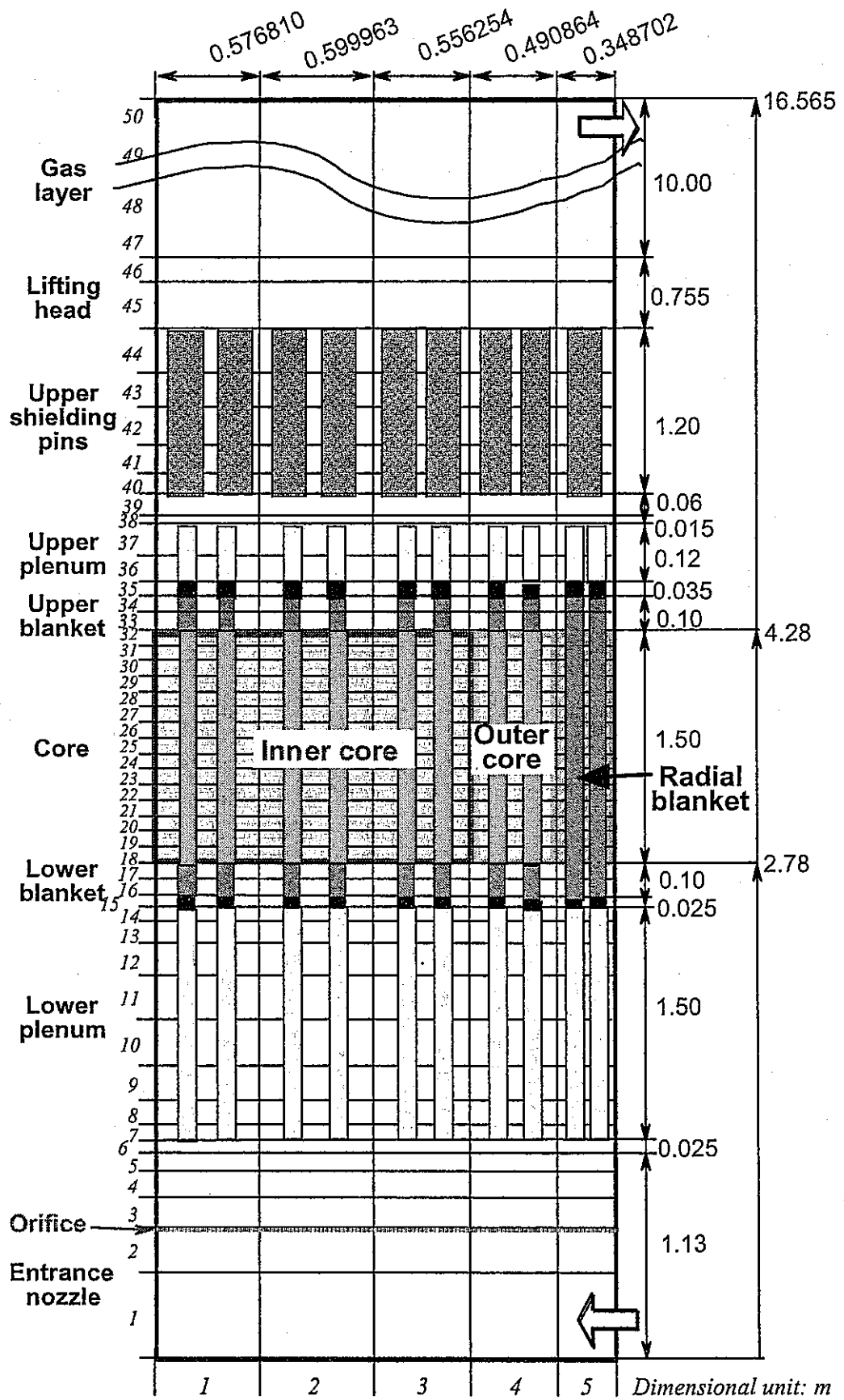


图 3 解析体系

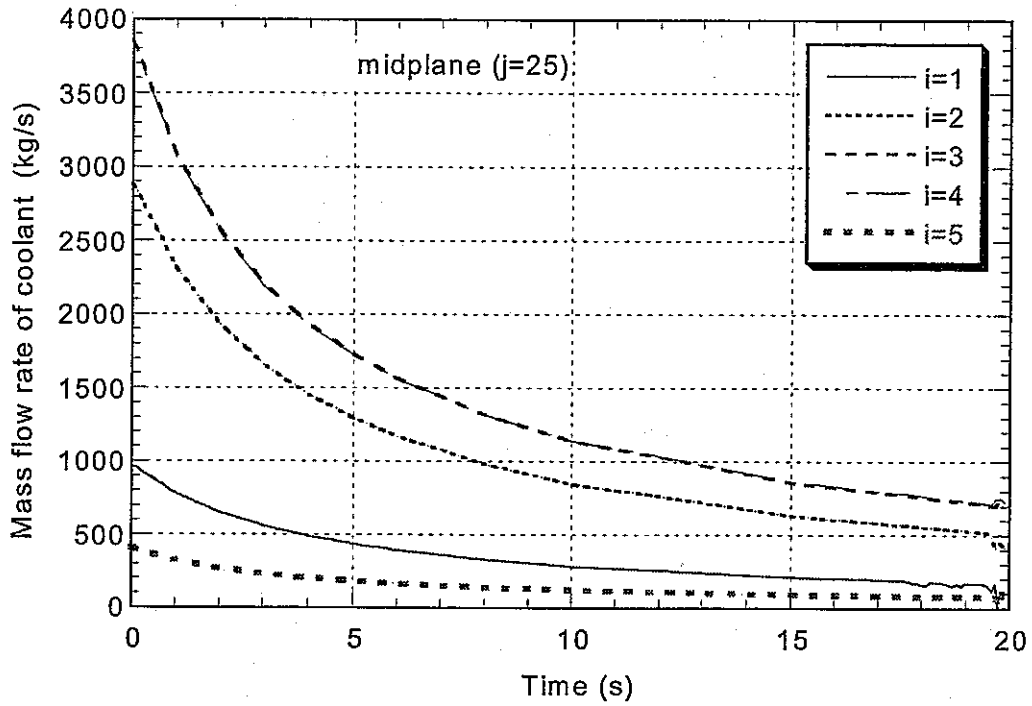


図4 冷却材の質量流量

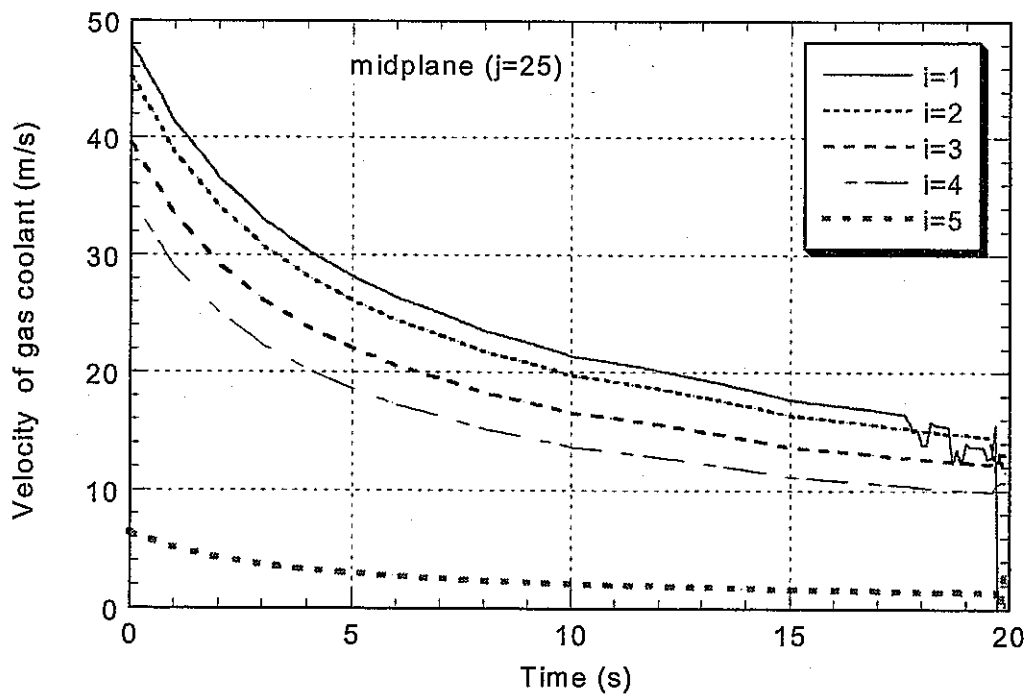


図5 冷却材流速

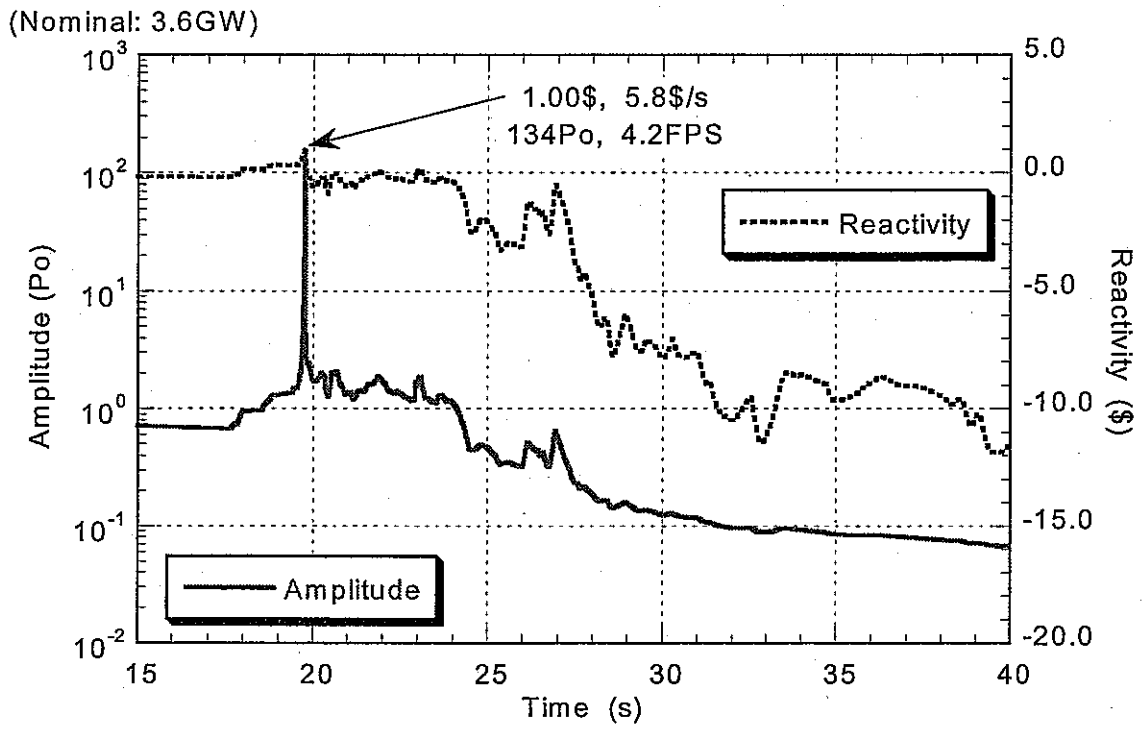


図6 反応度と規格化出力

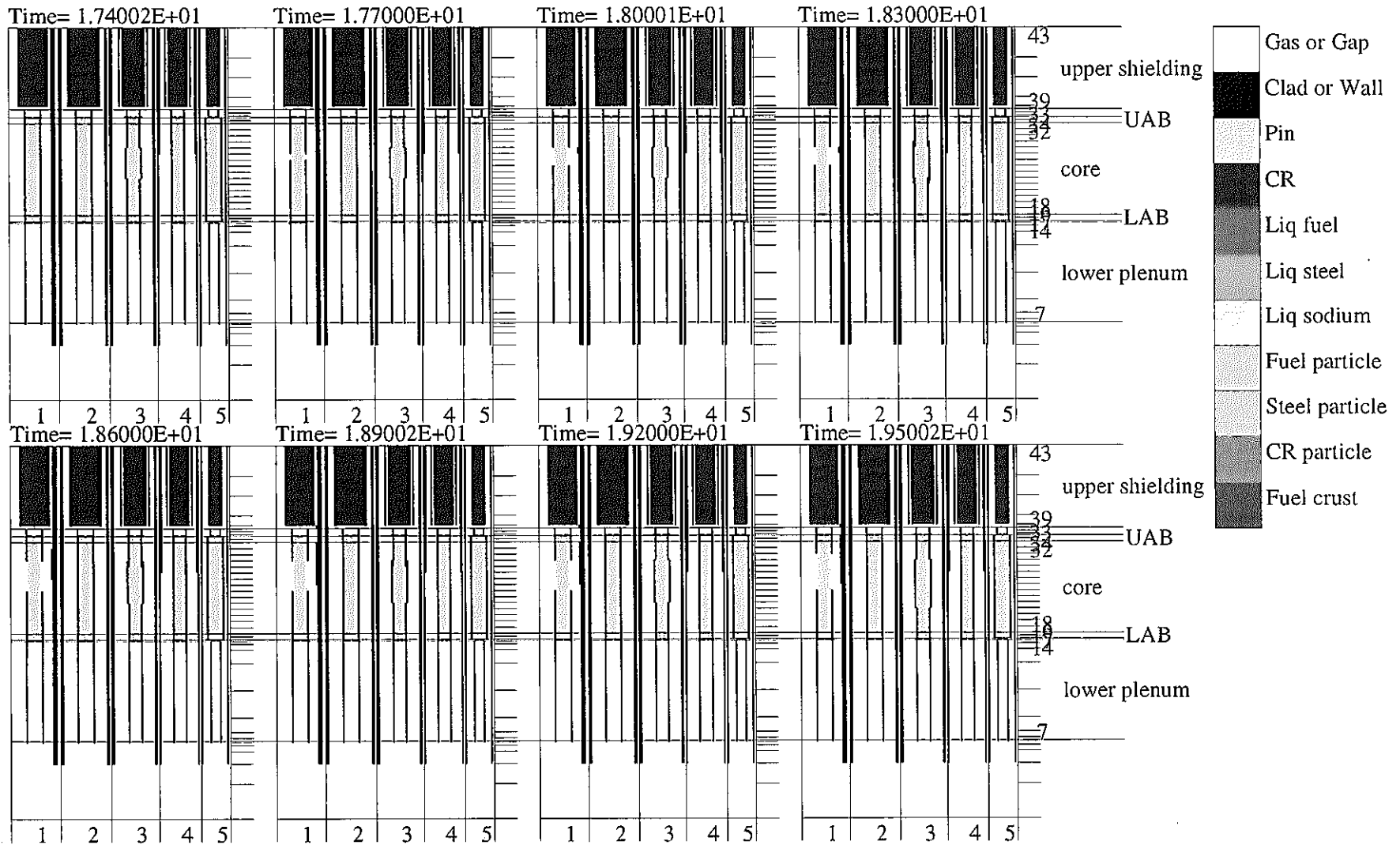


图 7 物質分布 (1/5)

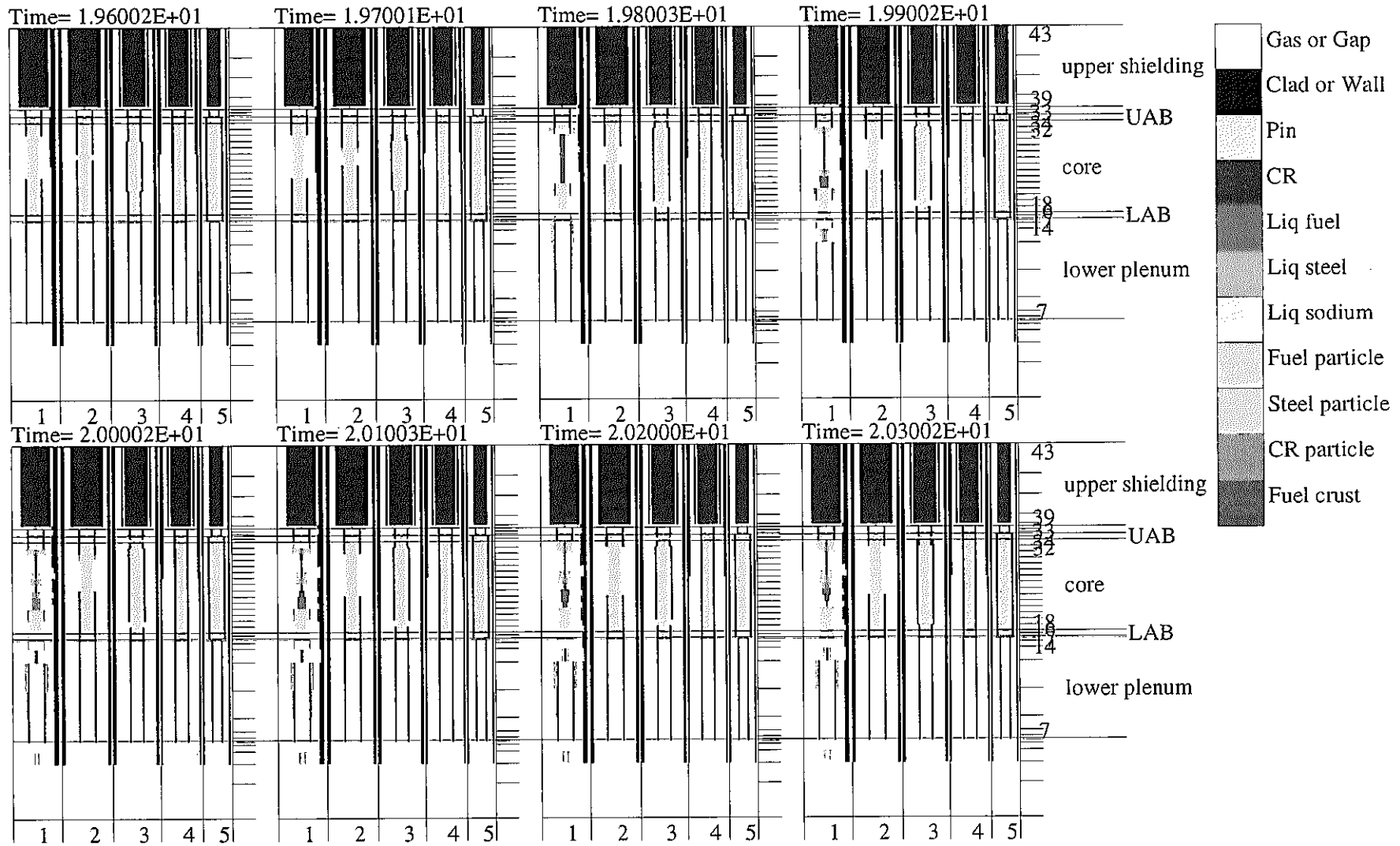


图7 物质分布 (2/5)

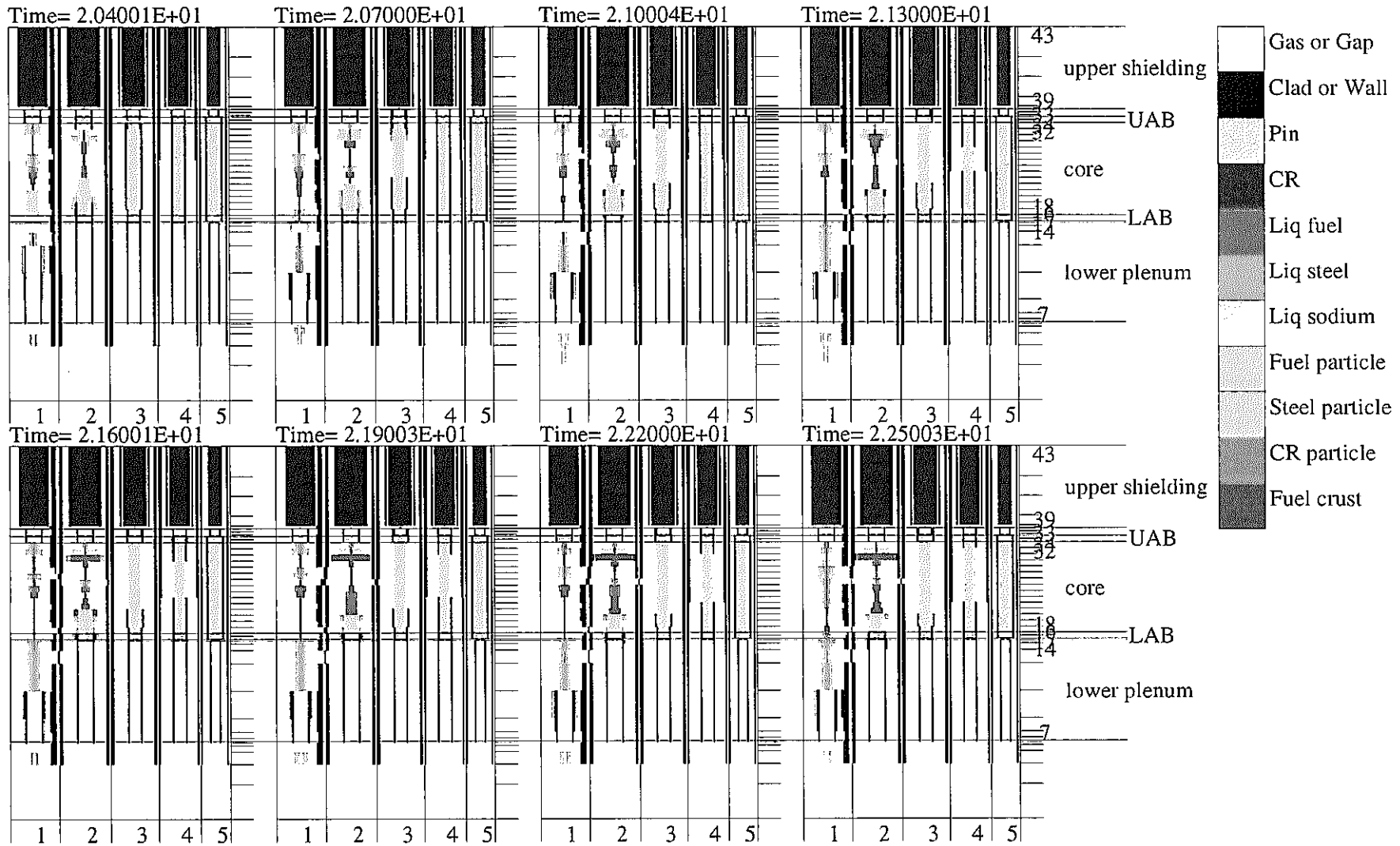


图7 物质分布 (3/5)

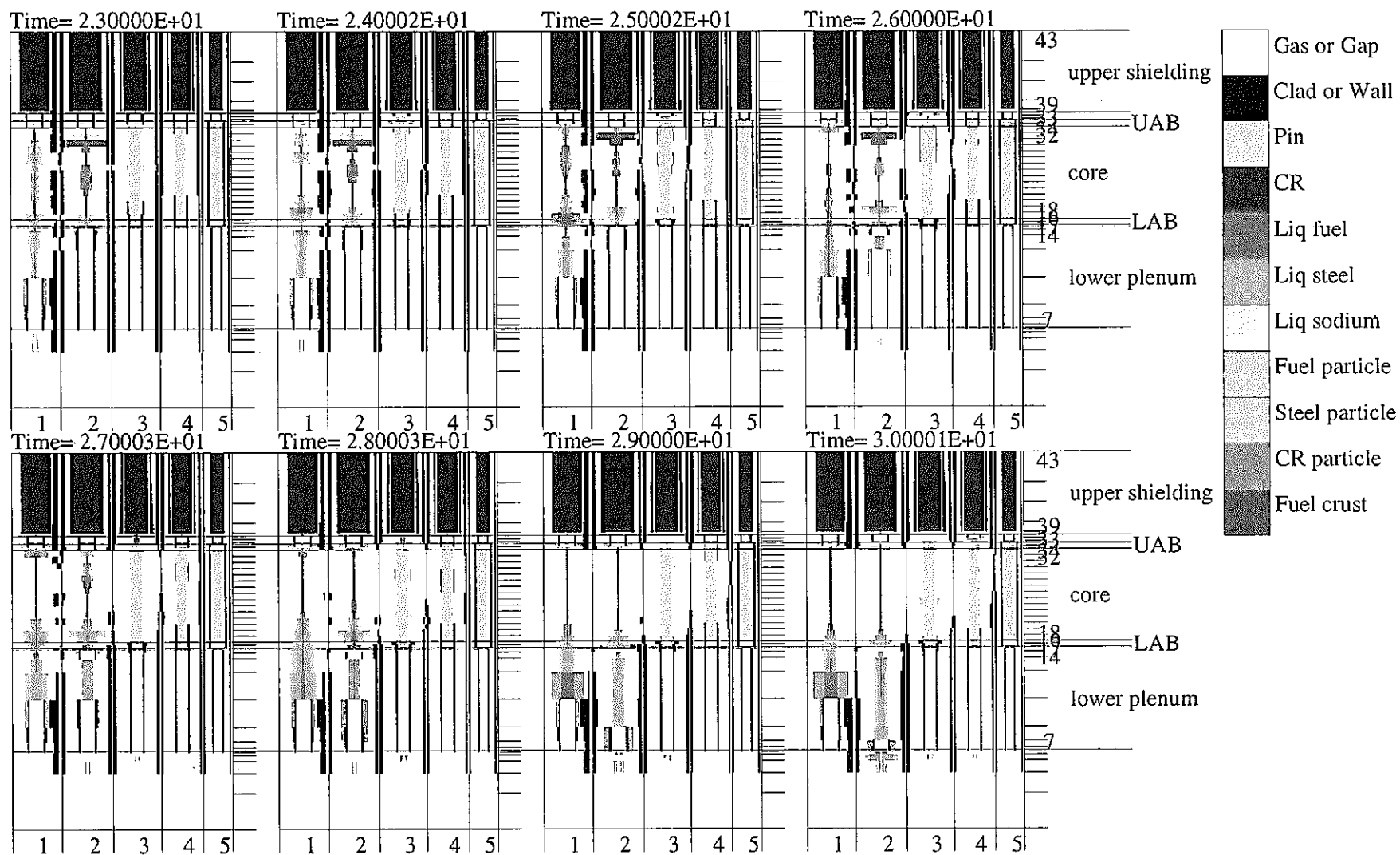


图 7 物质分布 (4/5)

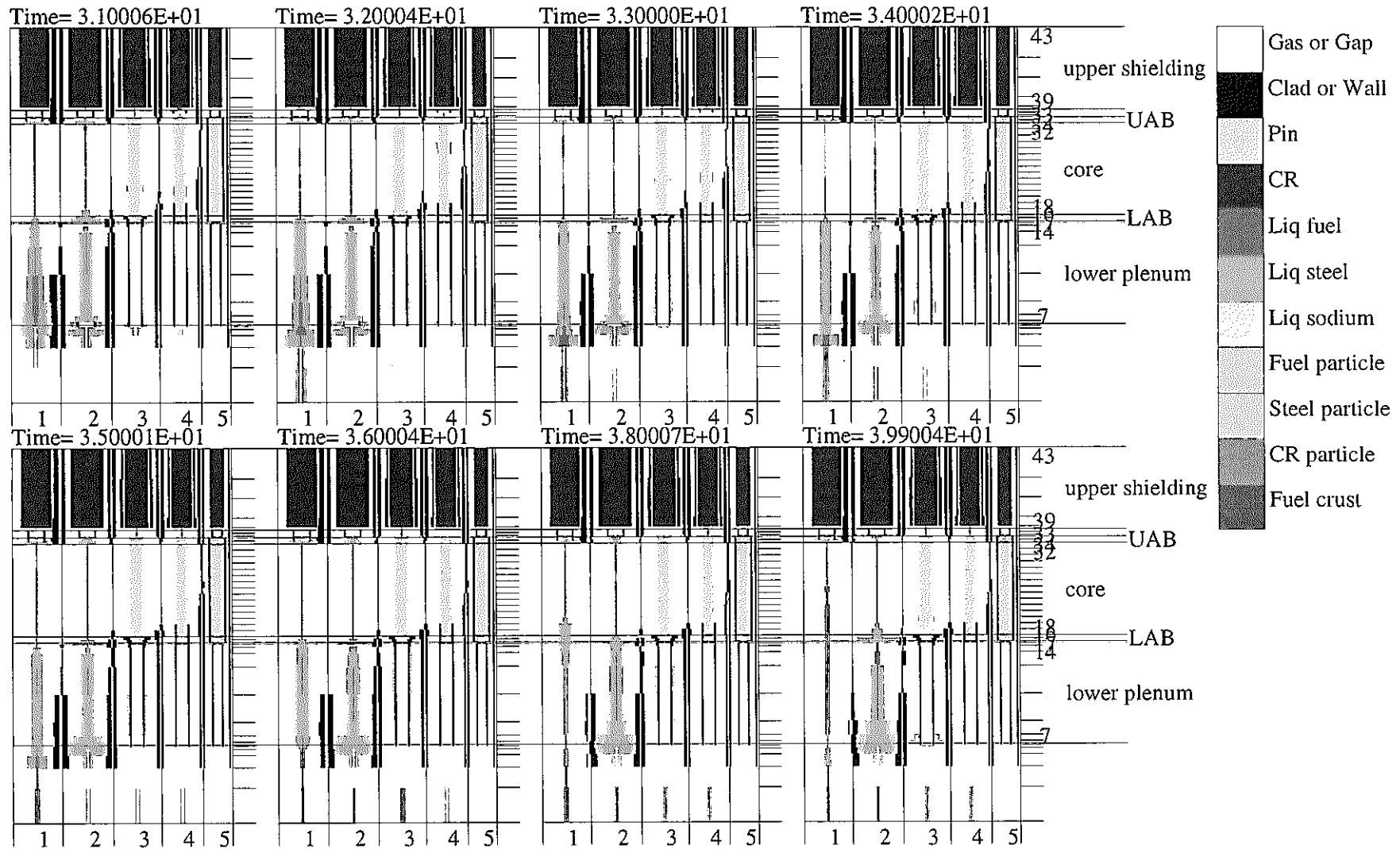


図7 物質分布 (5/5)

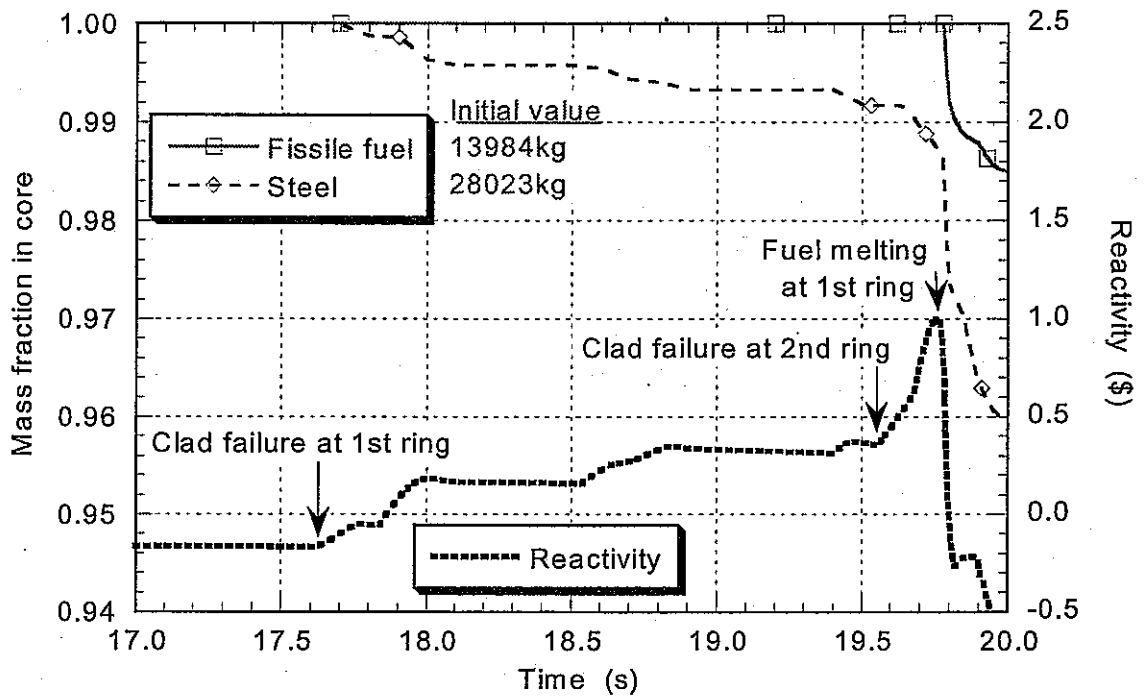


図8 反応度と炉心内 Fissile 燃料及びスチールの質量履歴

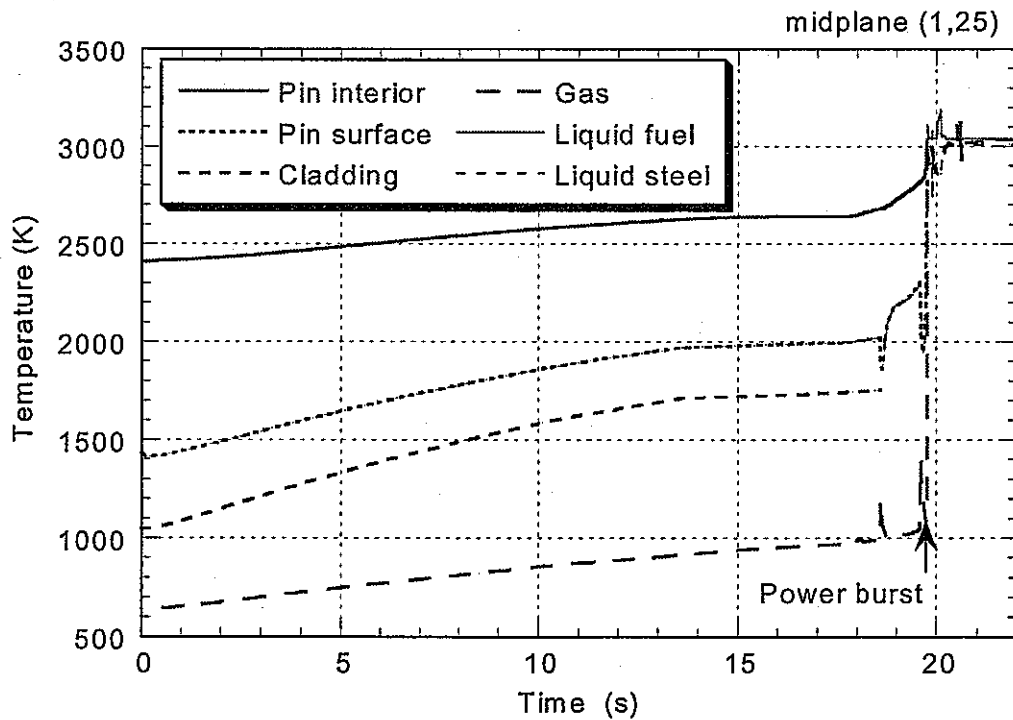


図9 第1リングにおける燃料、スチール及びガスの温度

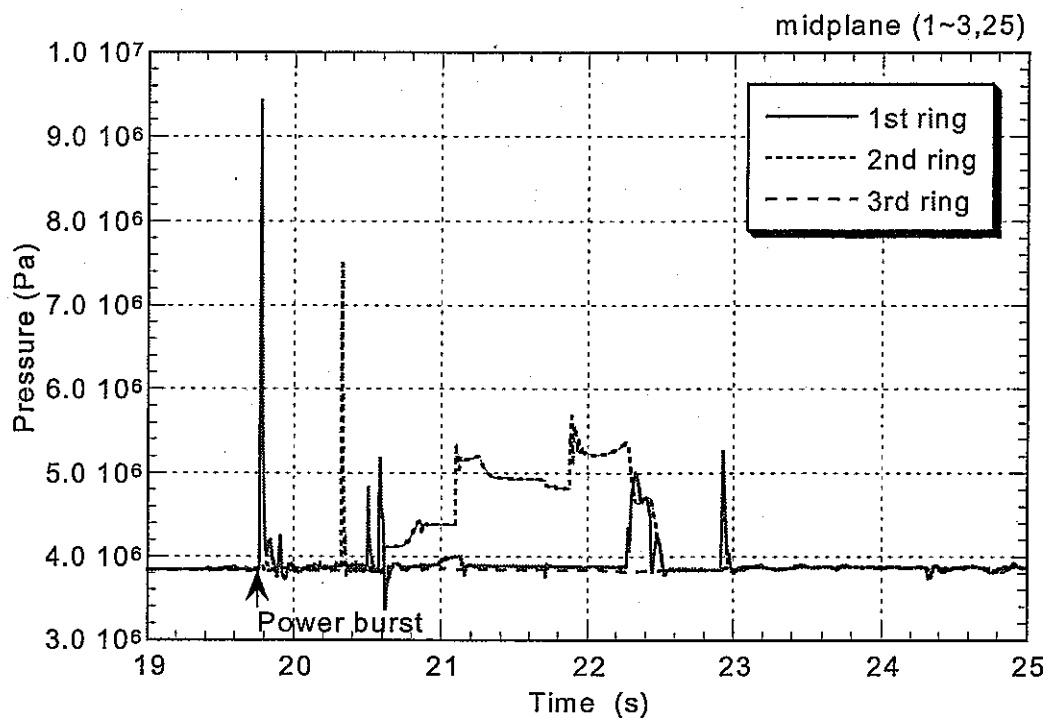


図 10 midplane における圧力履歴

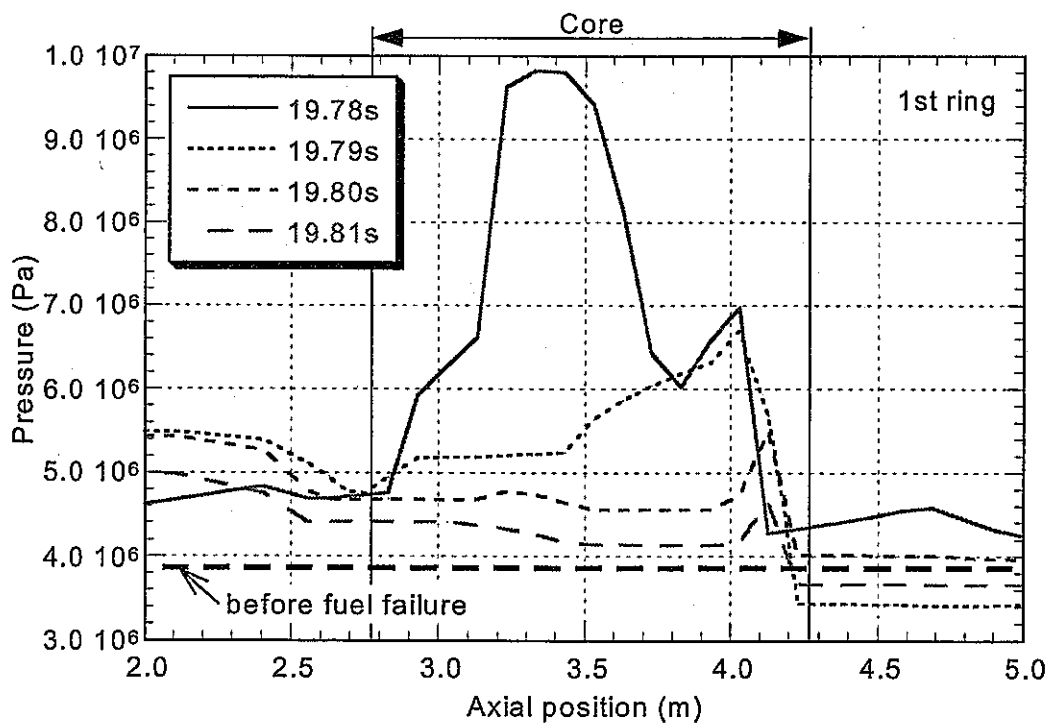


図 11 第 1 リングにおける燃料破損直後の軸方向圧力分布

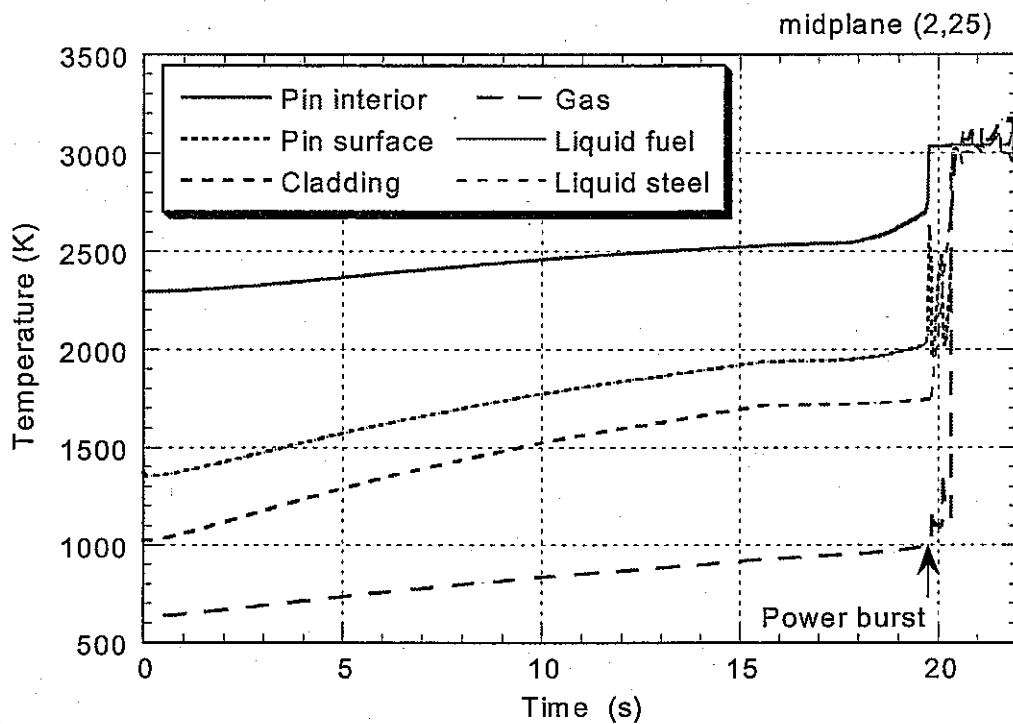


図 12 第 2 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度

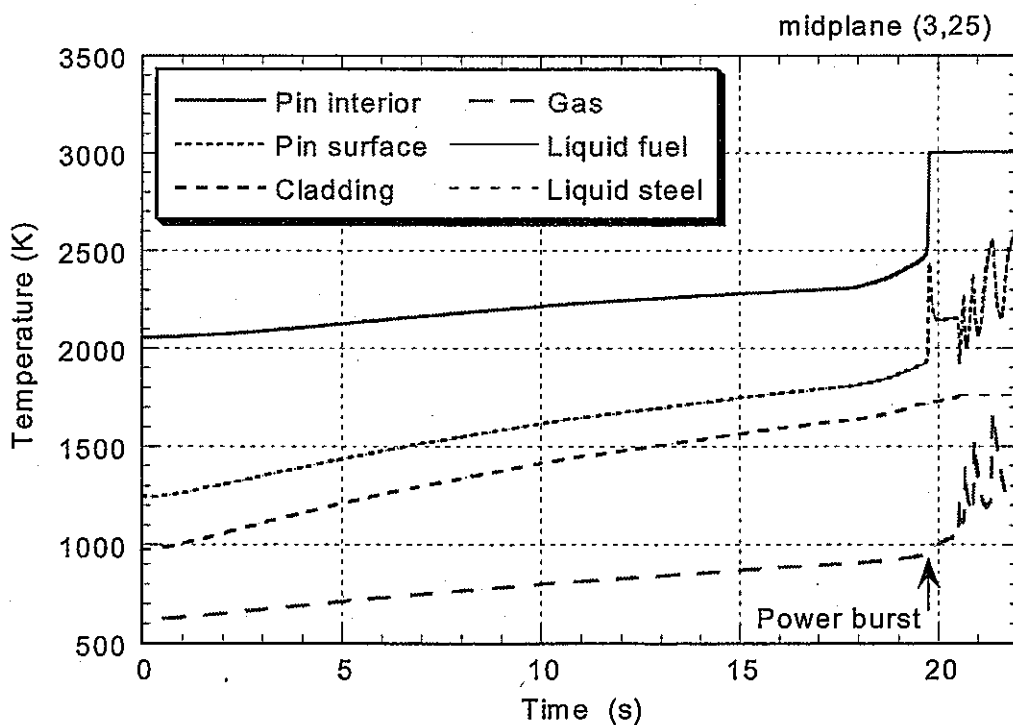


図 13 第 3 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度

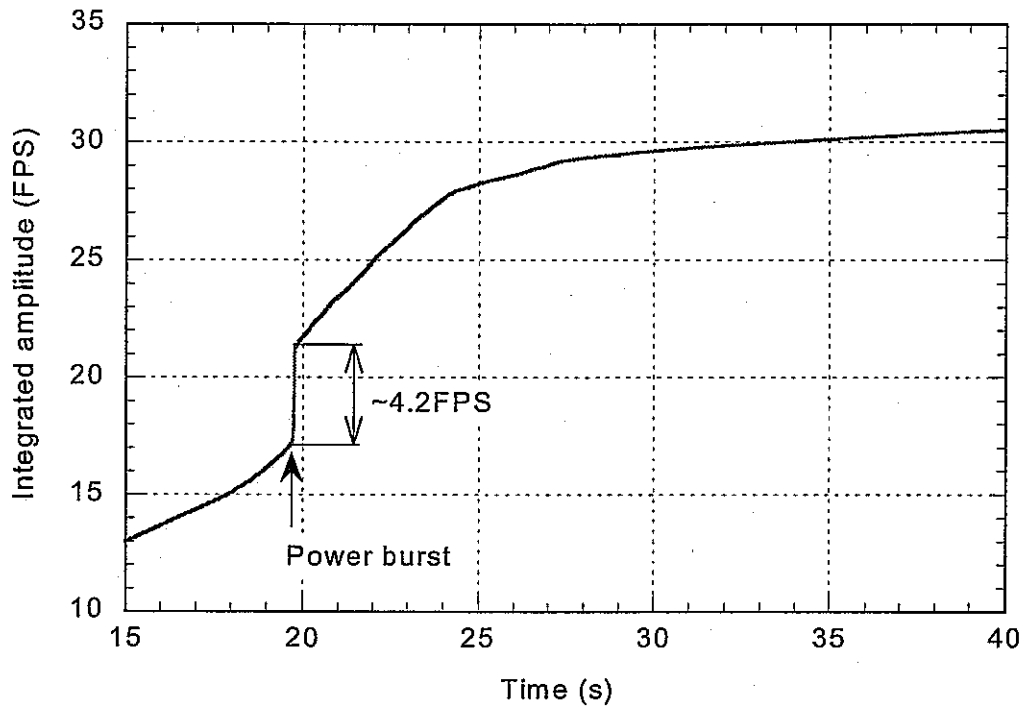


図 14 積算出力

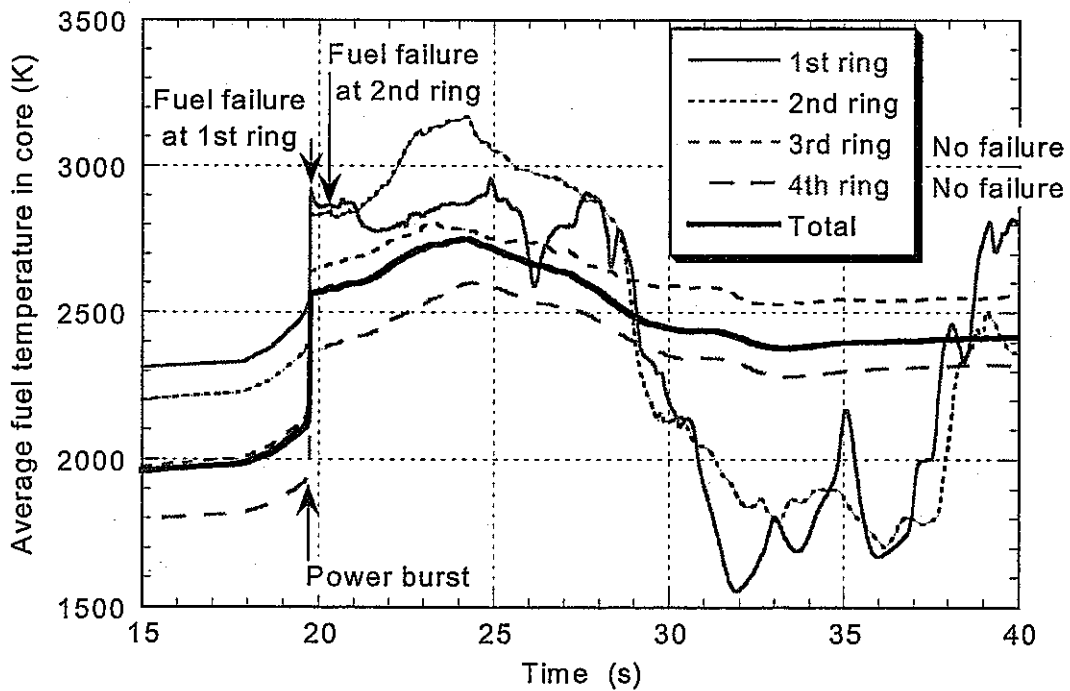


図 15 炉心内燃料平均温度

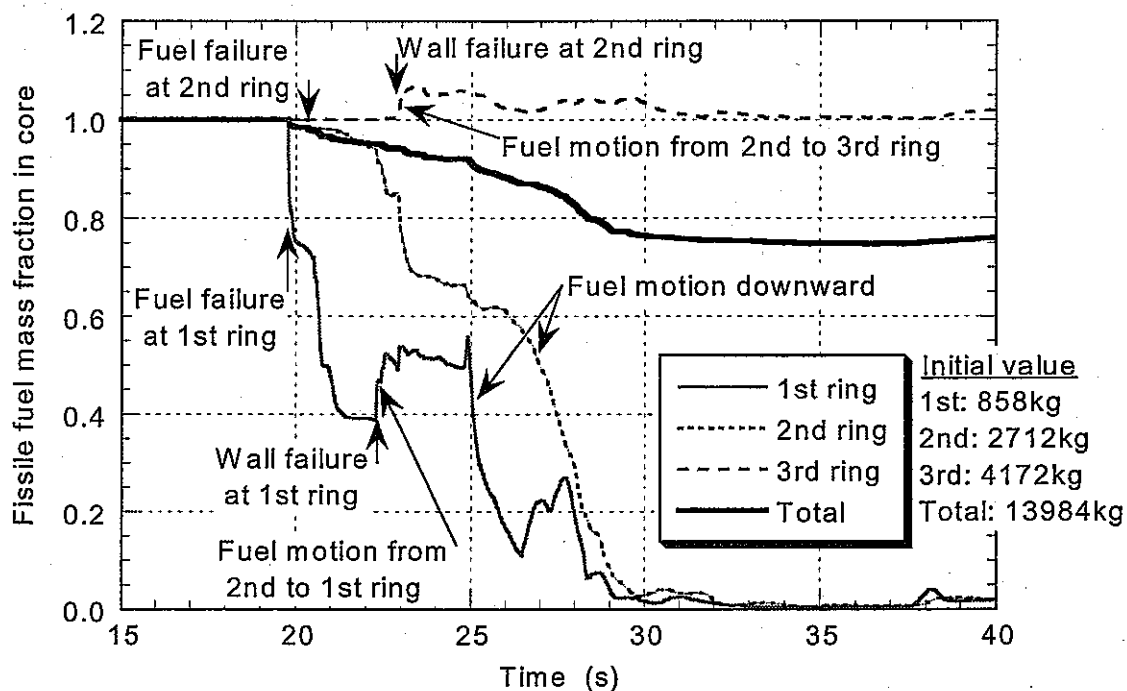


図 16 炉心内 Fissile 燃料の質量履歴

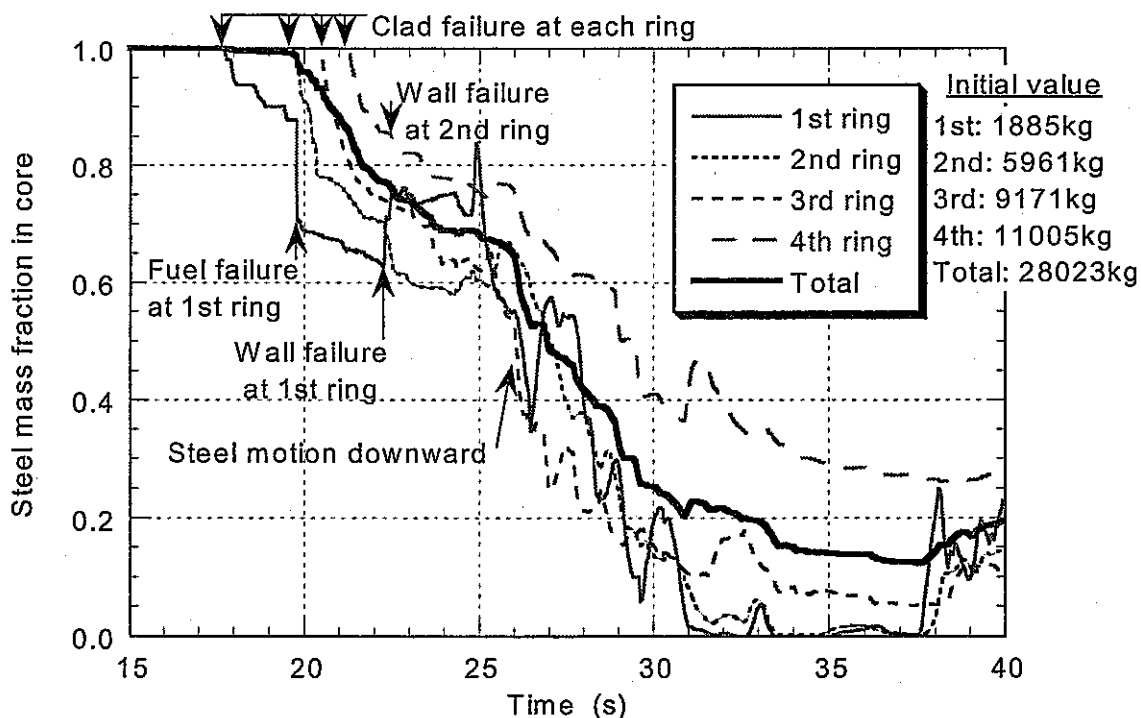


図 17 炉心内スチールの質量履歴

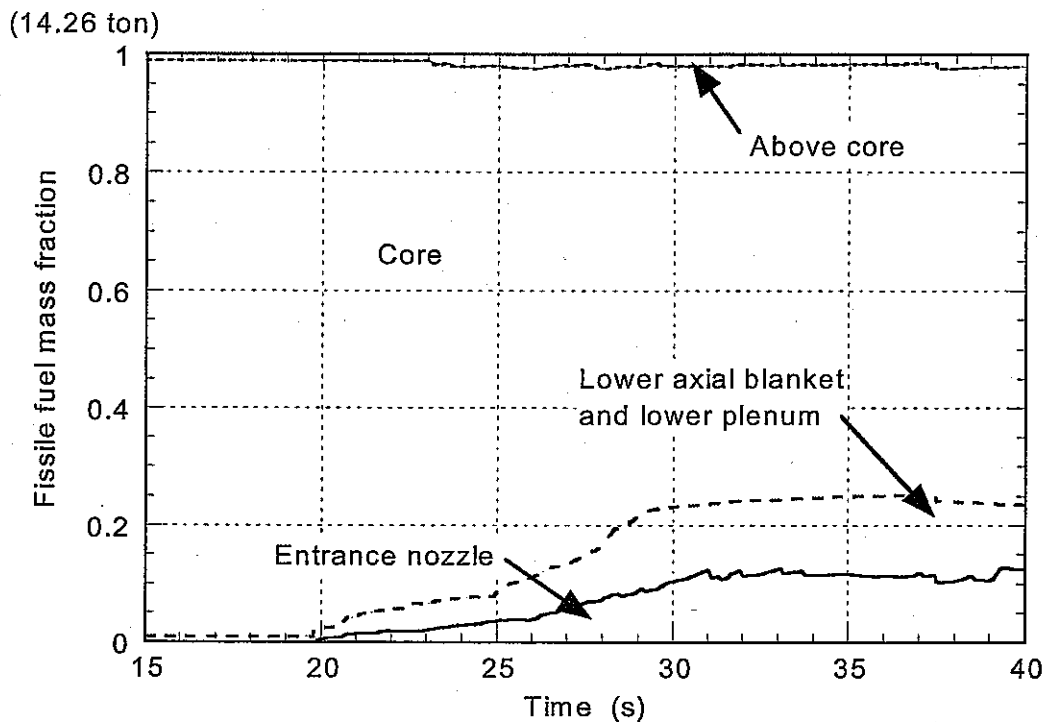


図 18 Fissile 燃料の分布

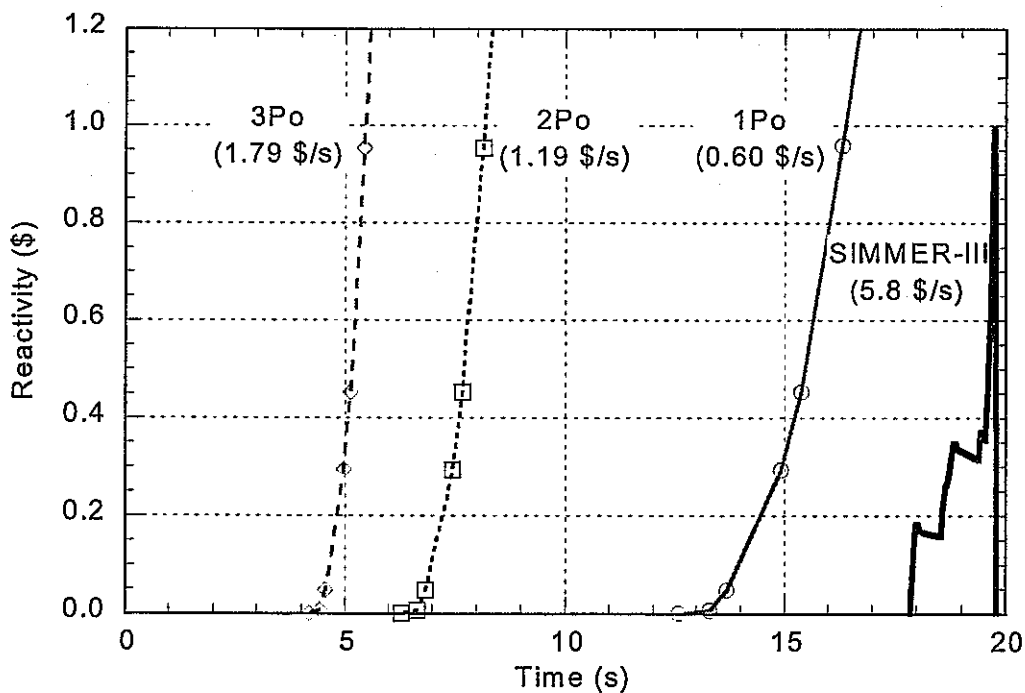


図 19 被覆管溶融移動の非同時性を考慮した反応度挿入率

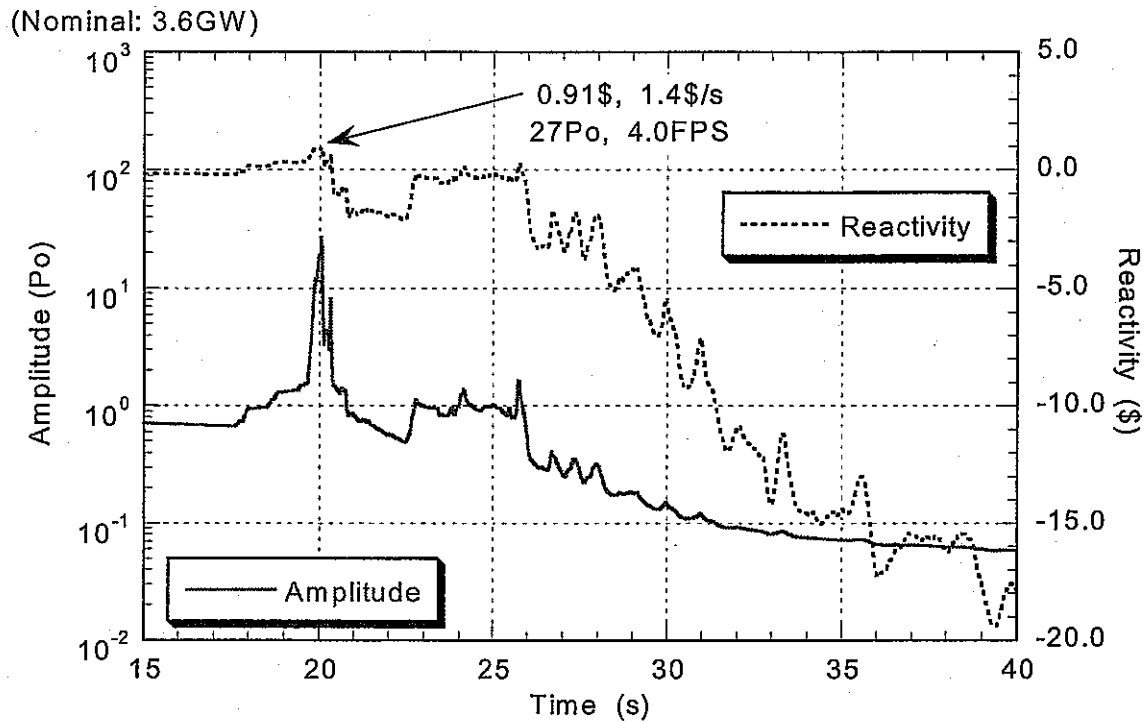


図 20 反応度及び規格化出力 (非同時性を考慮した場合)

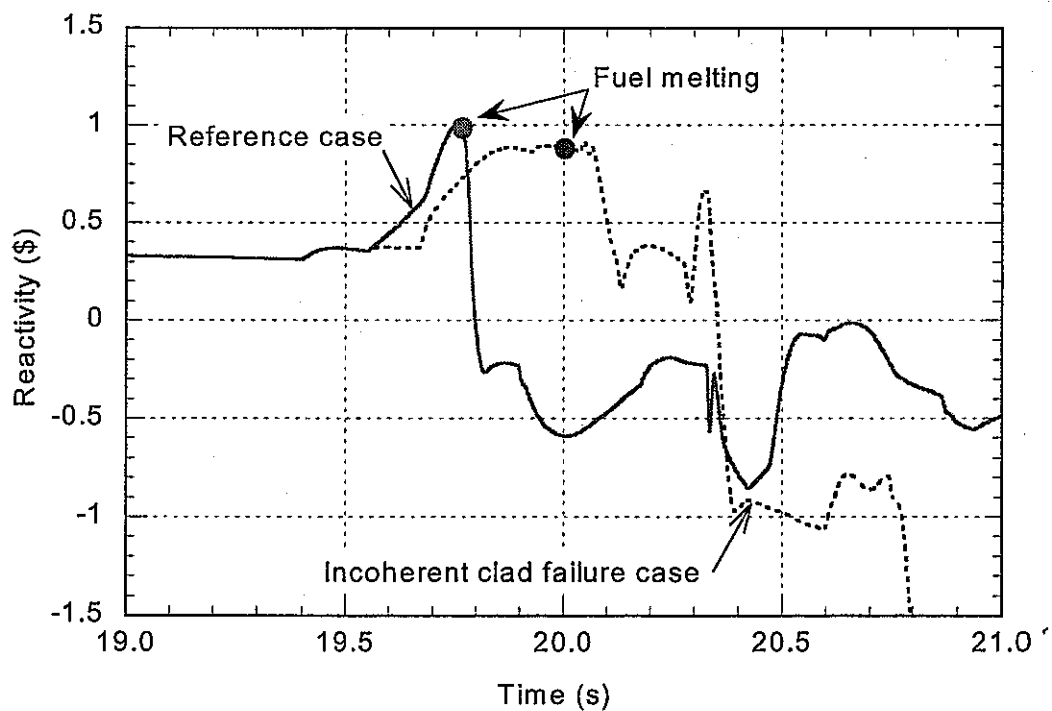


図 21 反応度履歴の比較

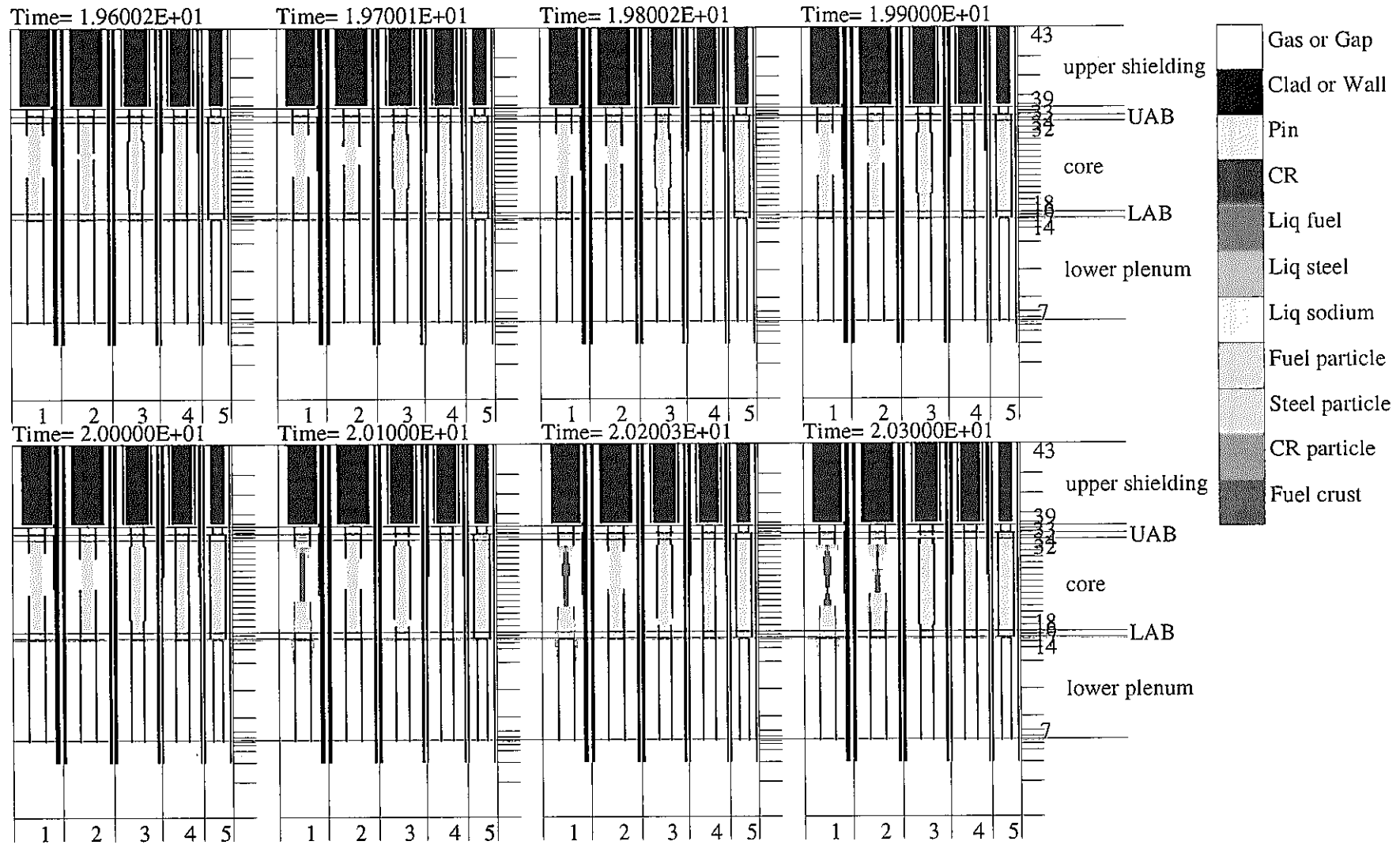


図 22 非同時性を考慮した場合の物質分布 (1/4)

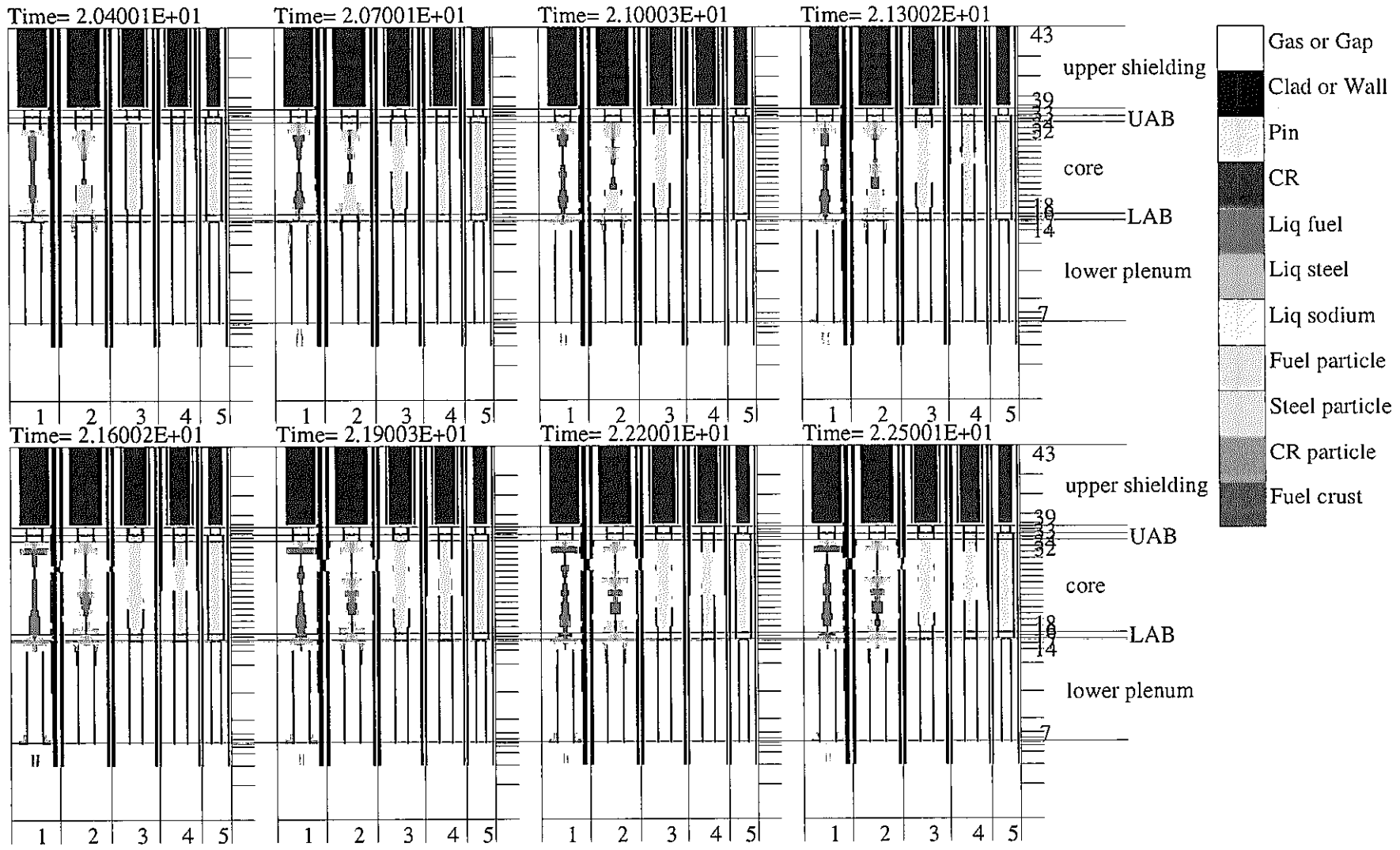


図 22 非同時性を考慮した場合の物質分布 (2/4)

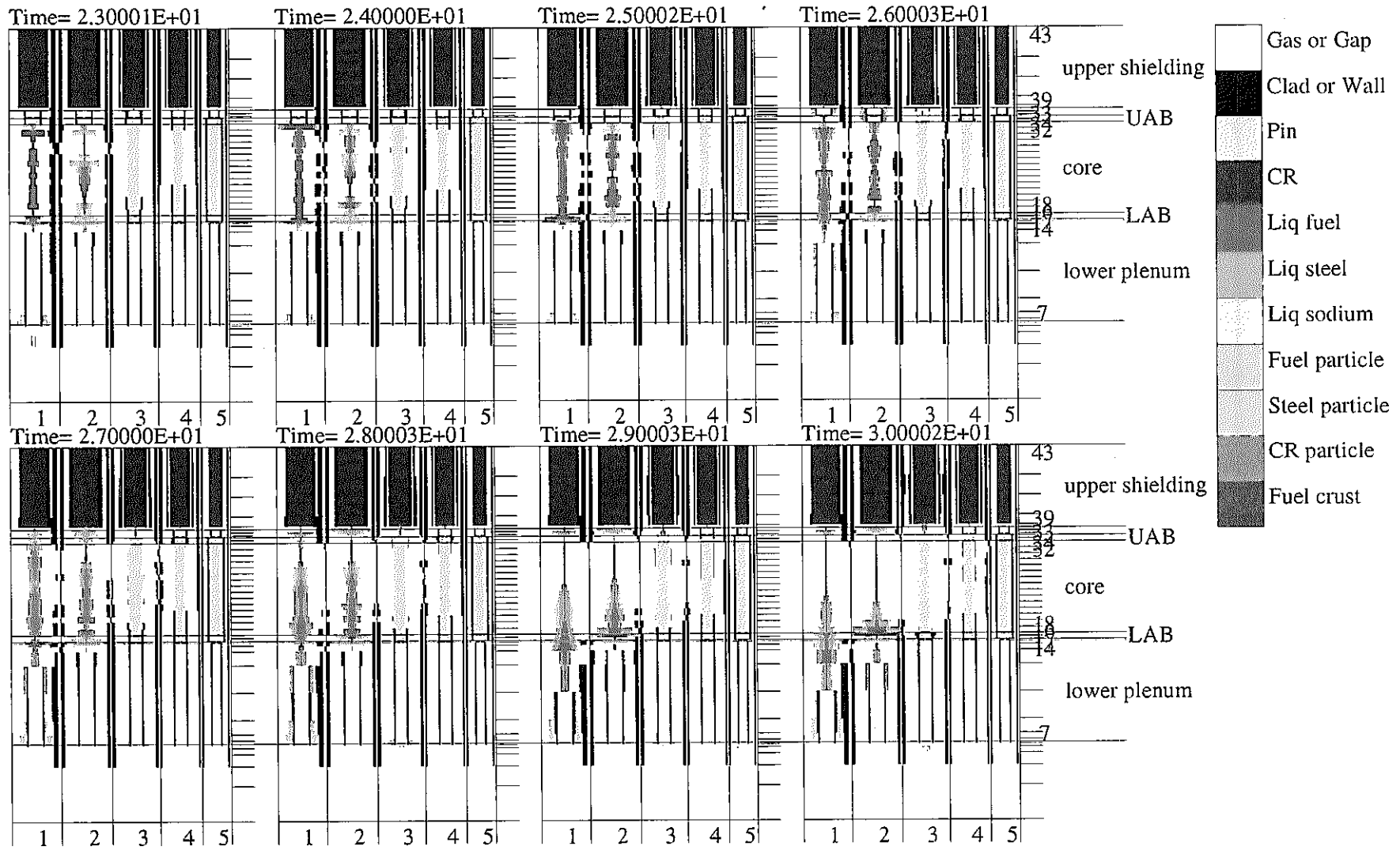


図 22 非同時性を考慮した場合の物質分布 (3/4)

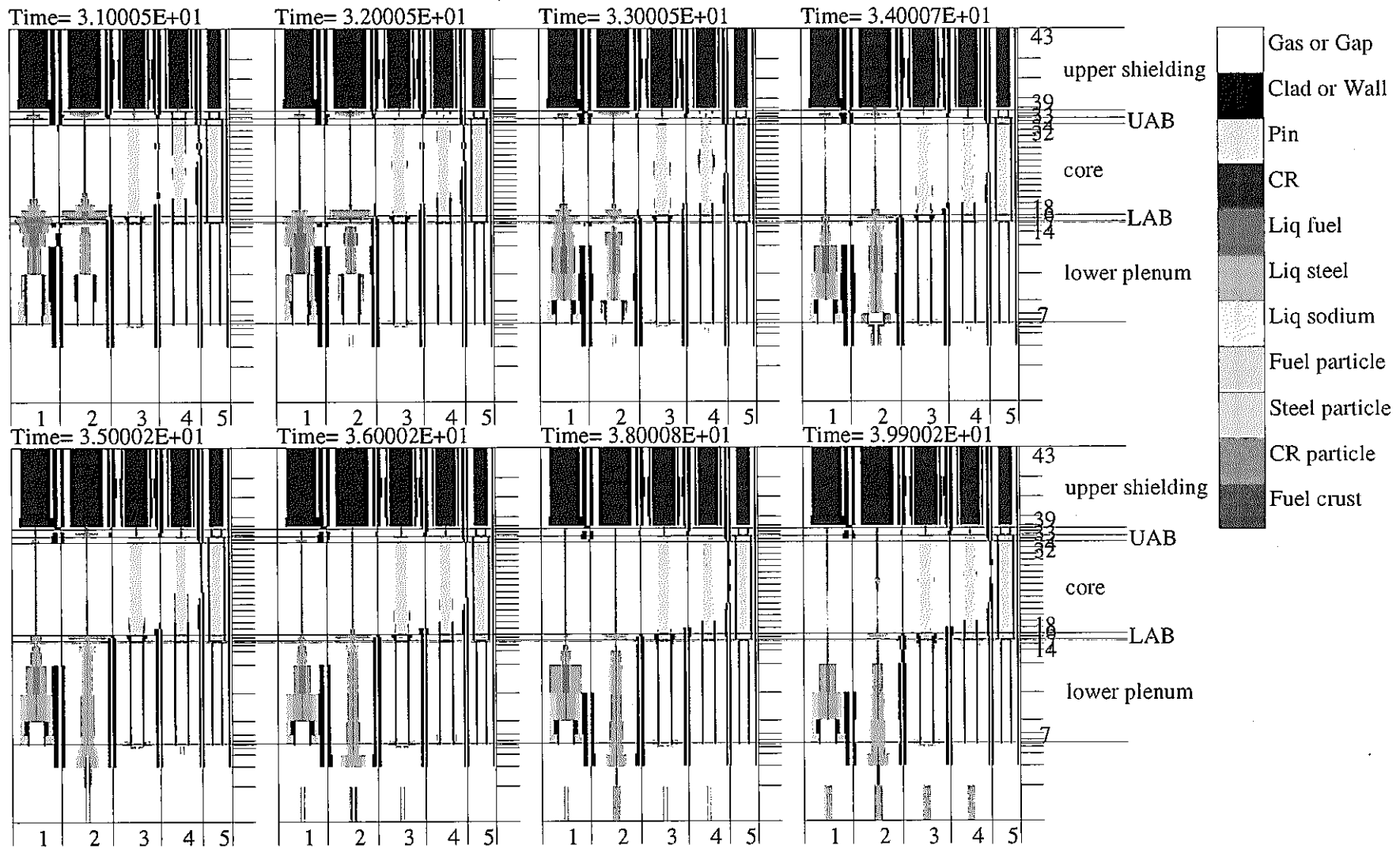


図 22 非同時性を考慮した場合の物質分布 (4/4)

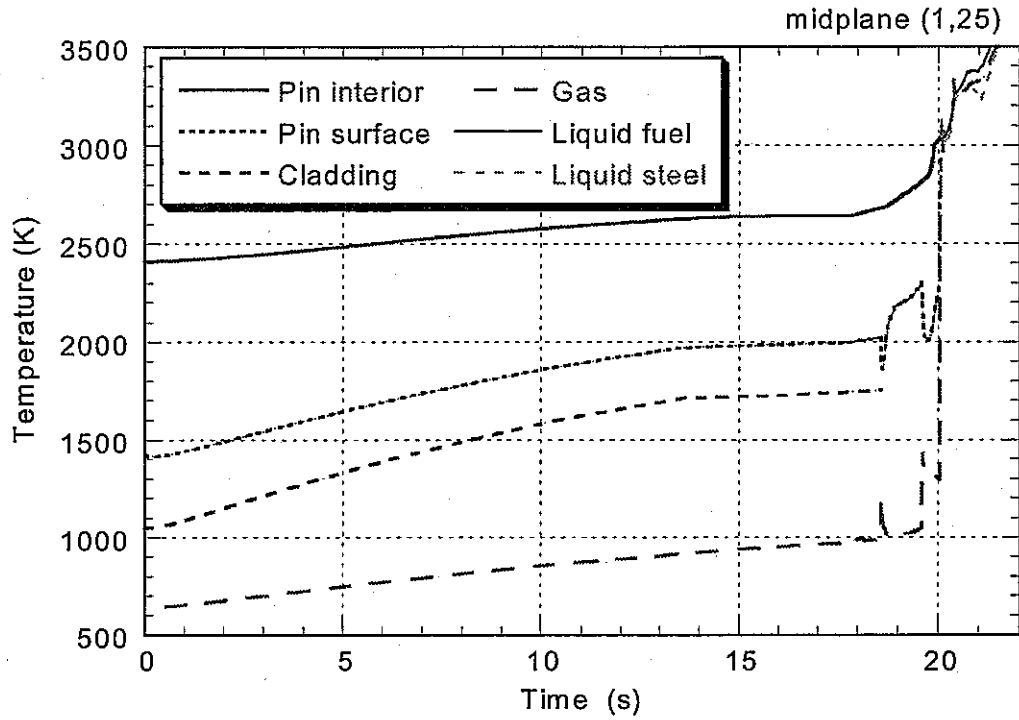


図 23 第 1 リングにおける燃料、スチール及びガスの温度（非同時性を考慮した場合）

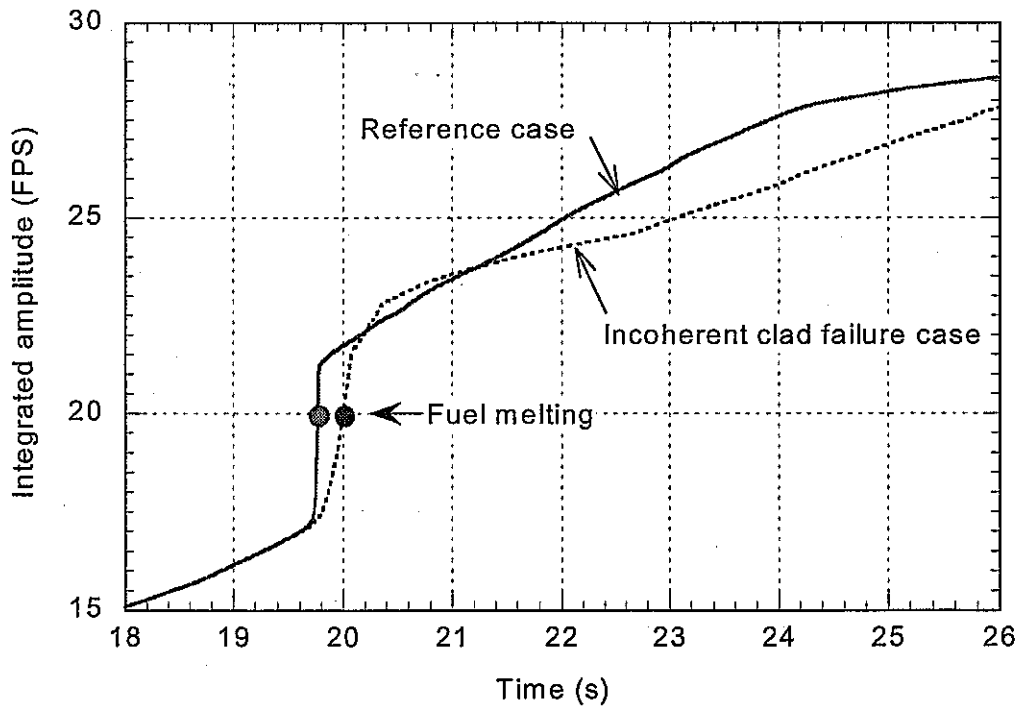


図 24 積算出力の比較

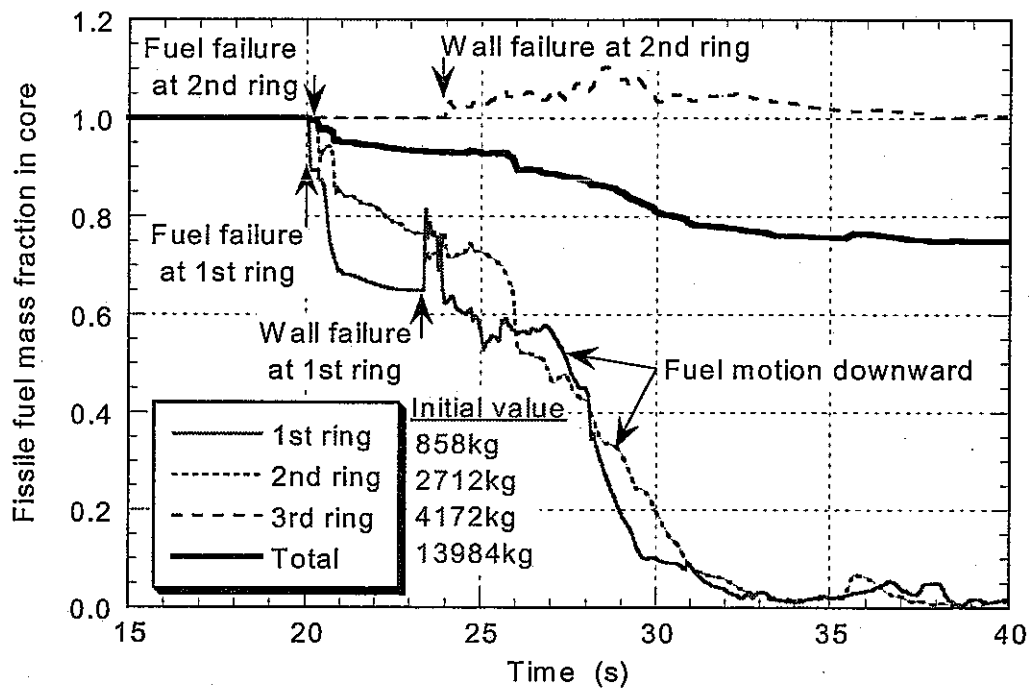


図 25 炉心内 Fissile 燃料の質量履歴 (非同時性を考慮した場合)

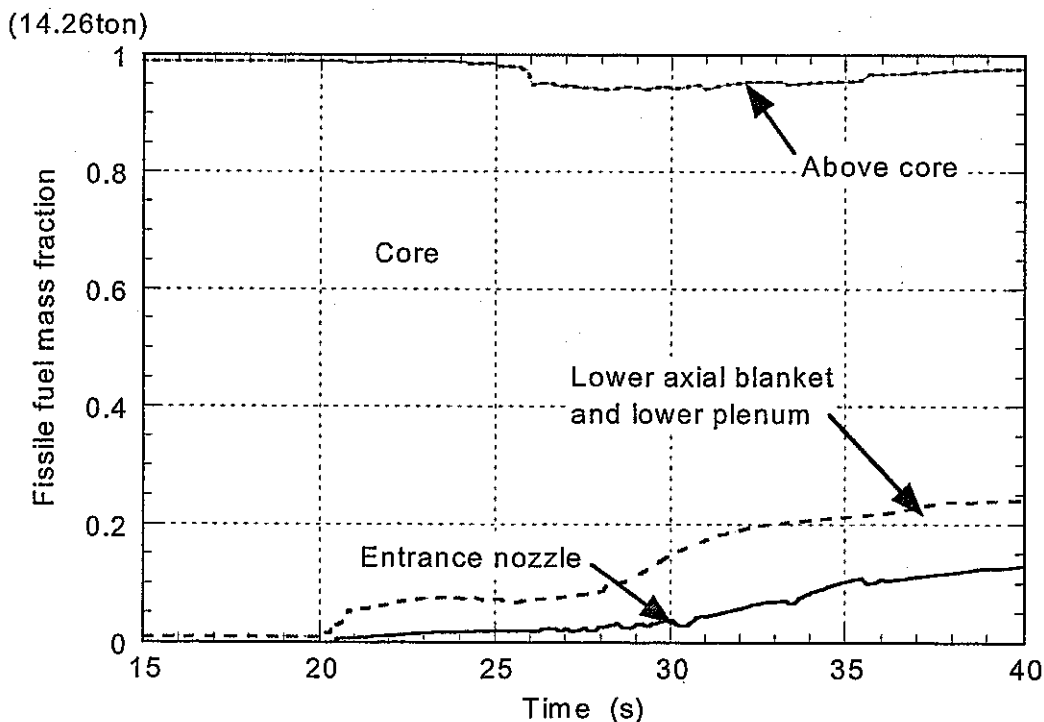


図 26 Fissile 燃料の分布 (非同時性を考慮した場合)

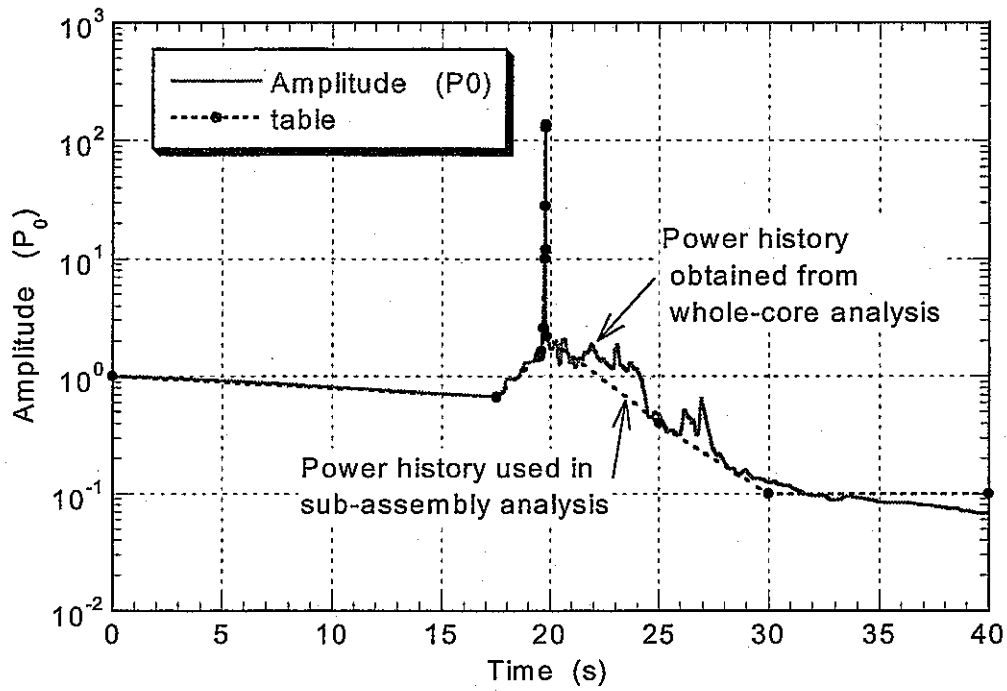


図 27 集合体規模解析で用いた出力履歴

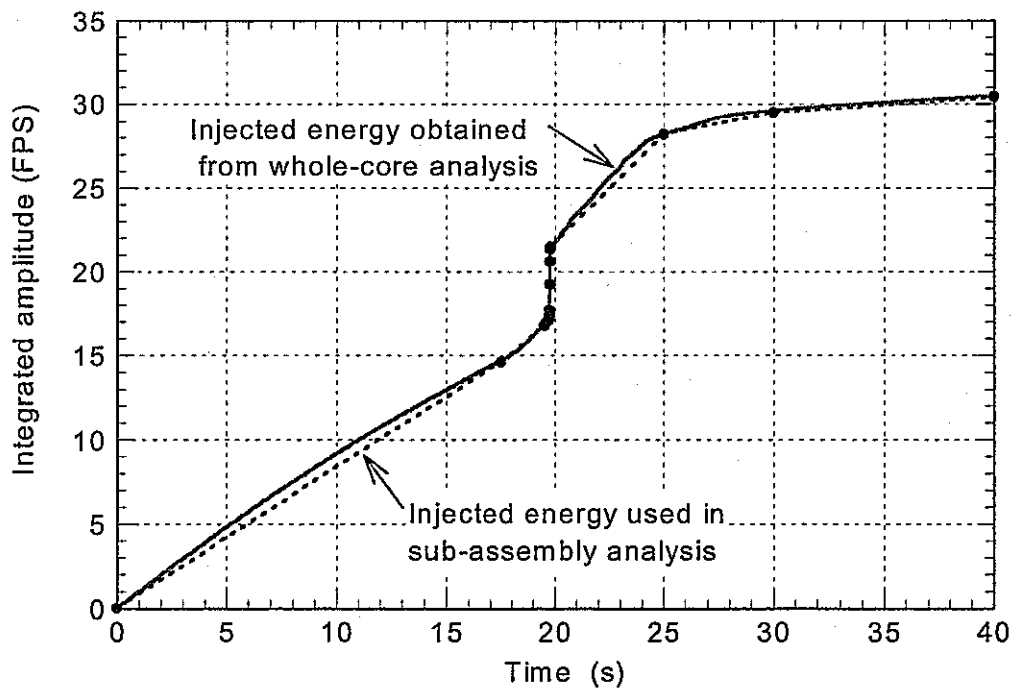


図 28 投入エネルギーの履歴

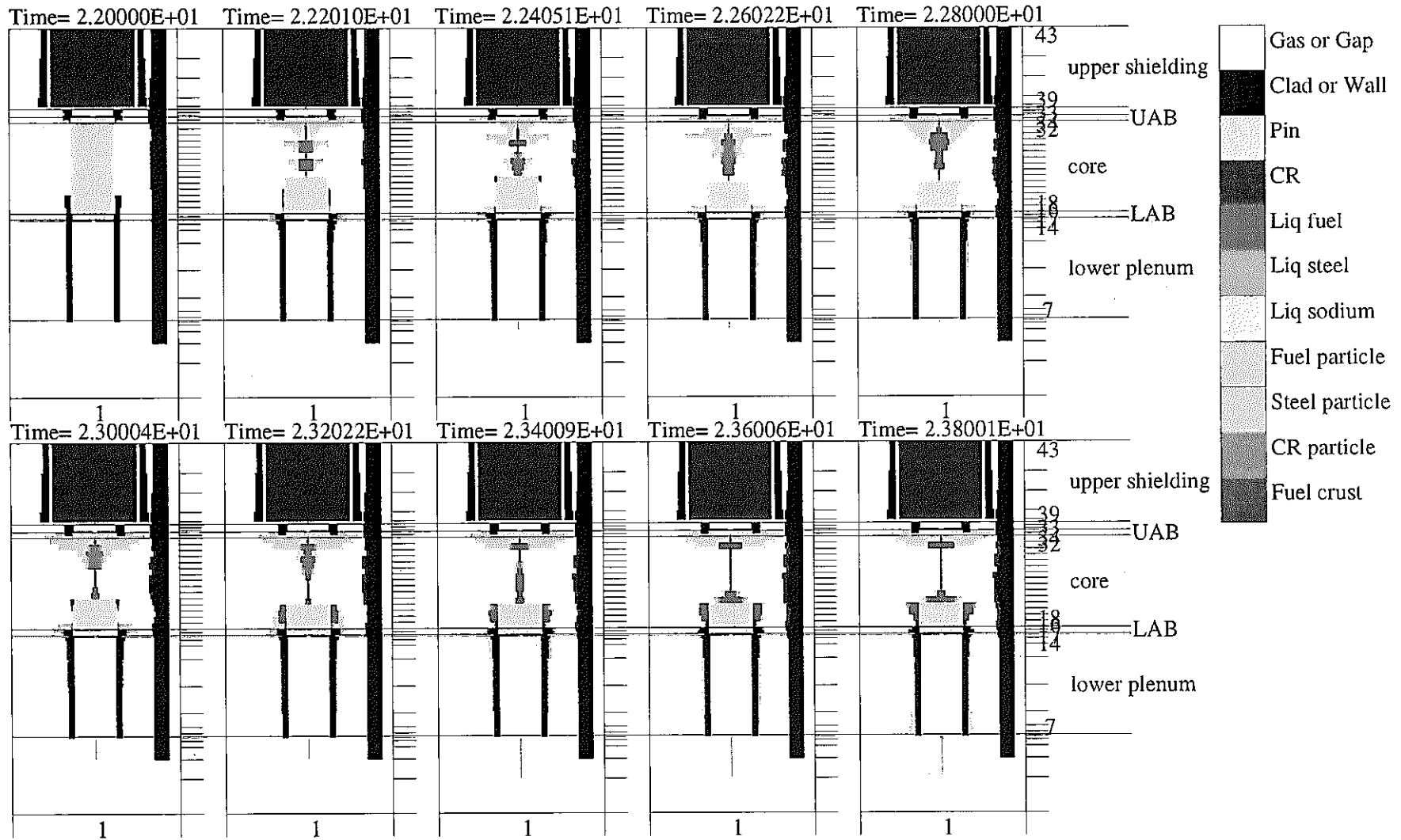


図 29 リファレンス炉心における物質分布 (集合体規模解析) (1/2)

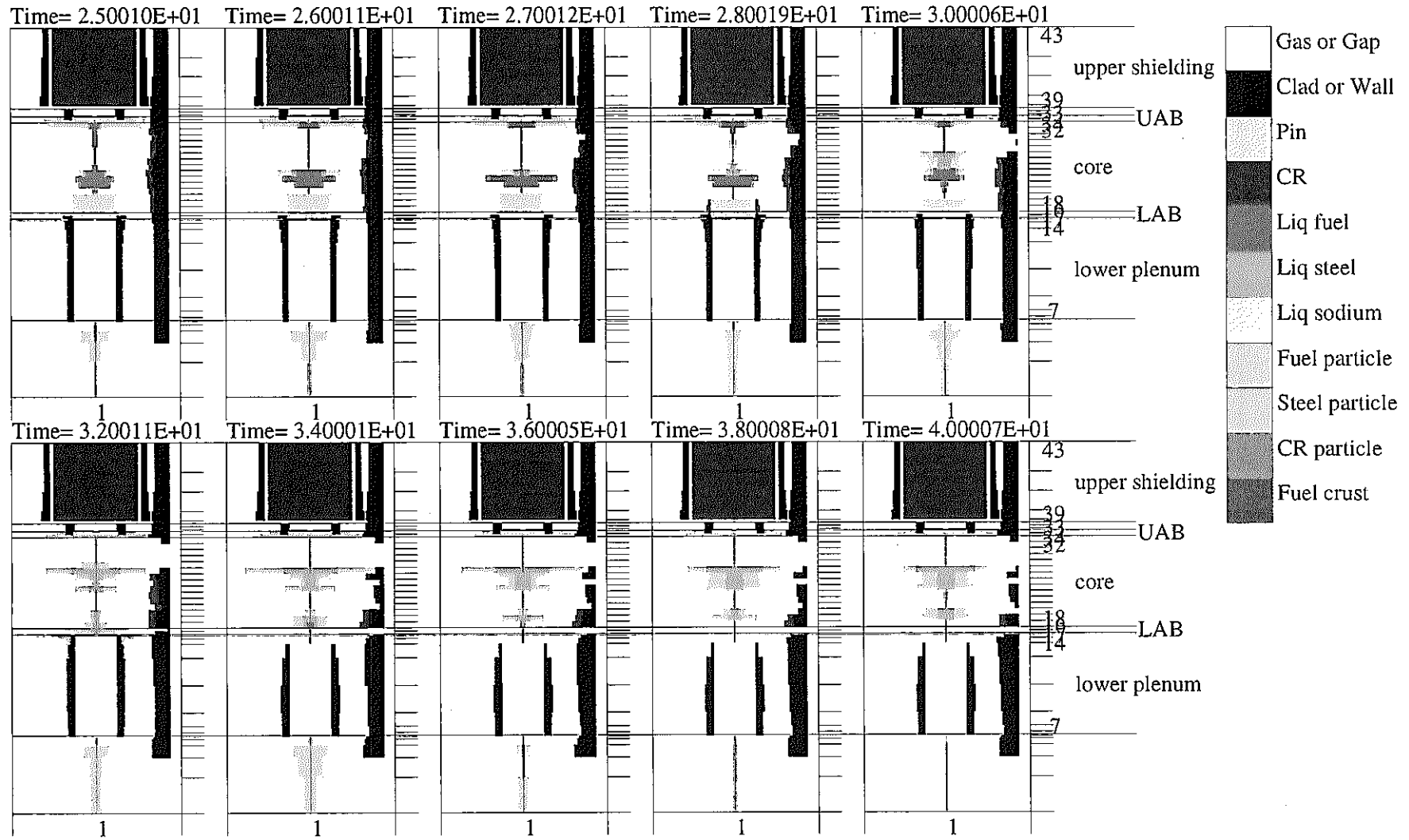


図 29 リファレンス炉心における物質分布 (集合体規模解析) (2/2)

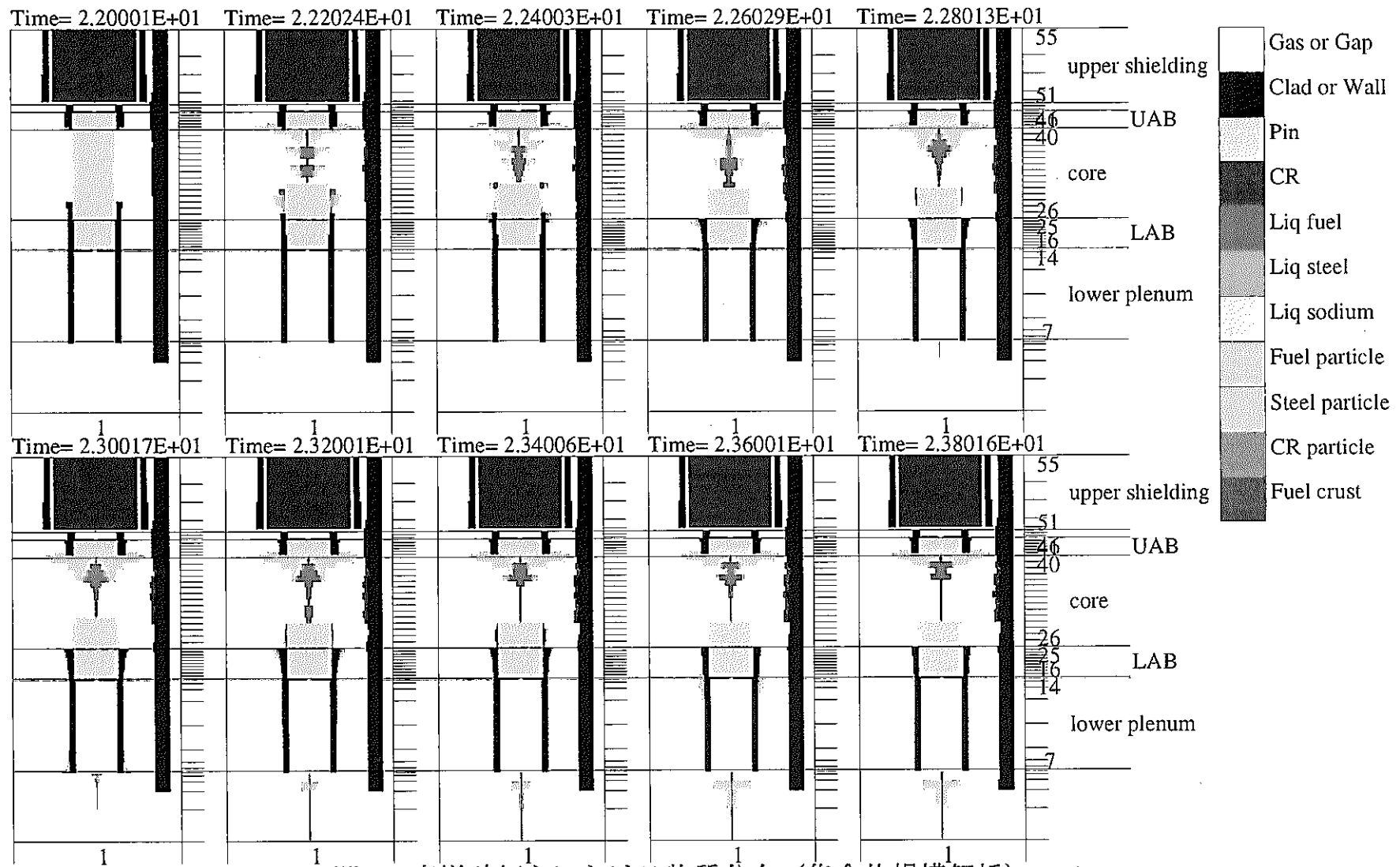


図 30 高増殖炉心における物質分布 (集合体規模解析) (1/2)

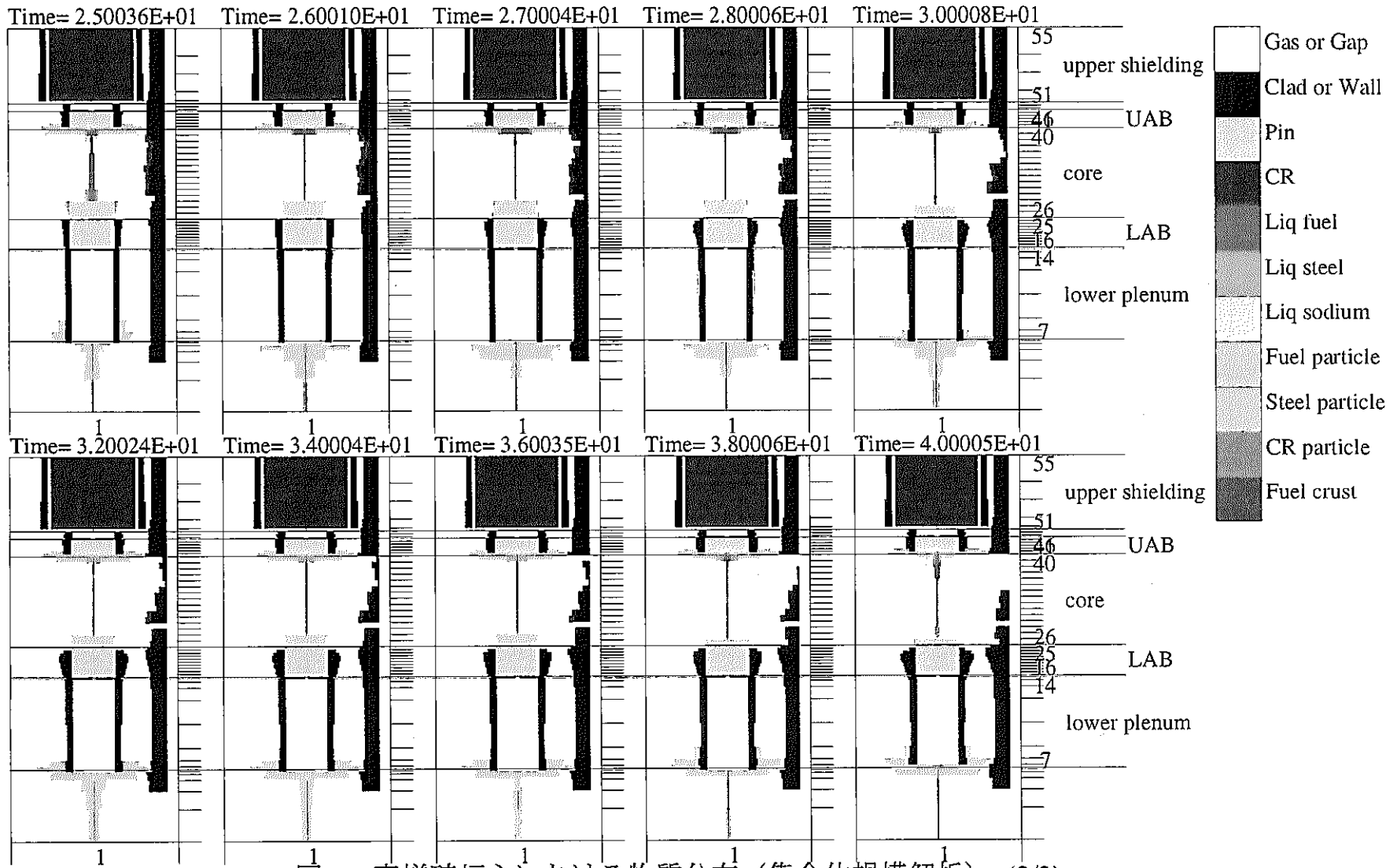


図 30 高増殖炉心における物質分布 (集合体規模解析) (2/2)

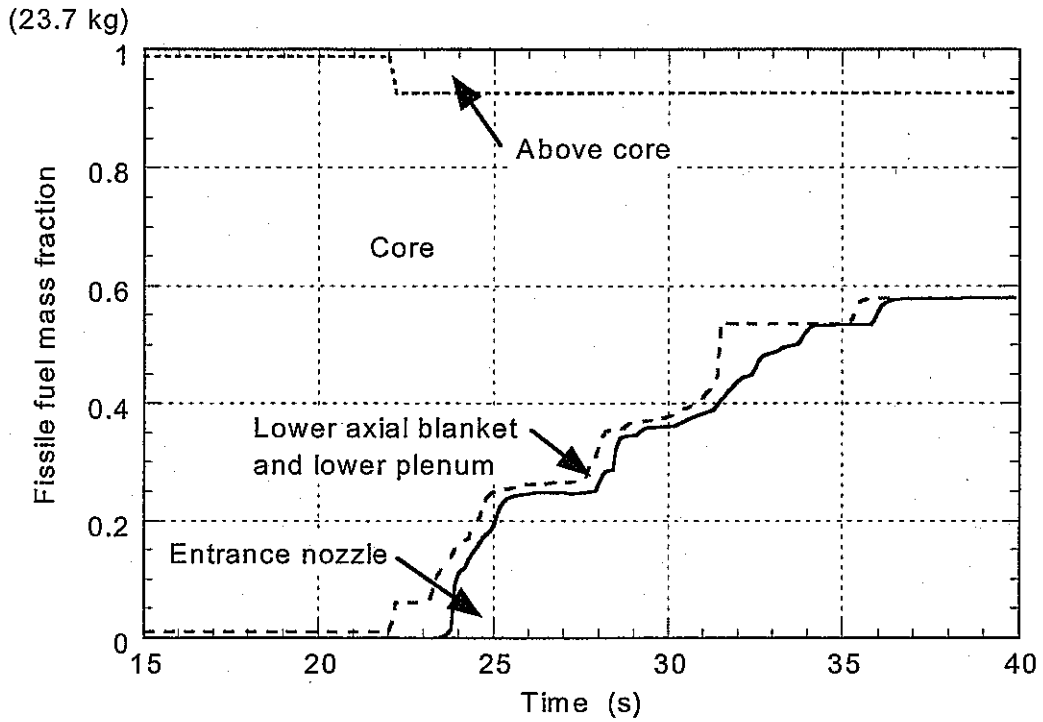


図 31 リファレンス炉心における Fissile 燃料の分布 (集合体規模解析)

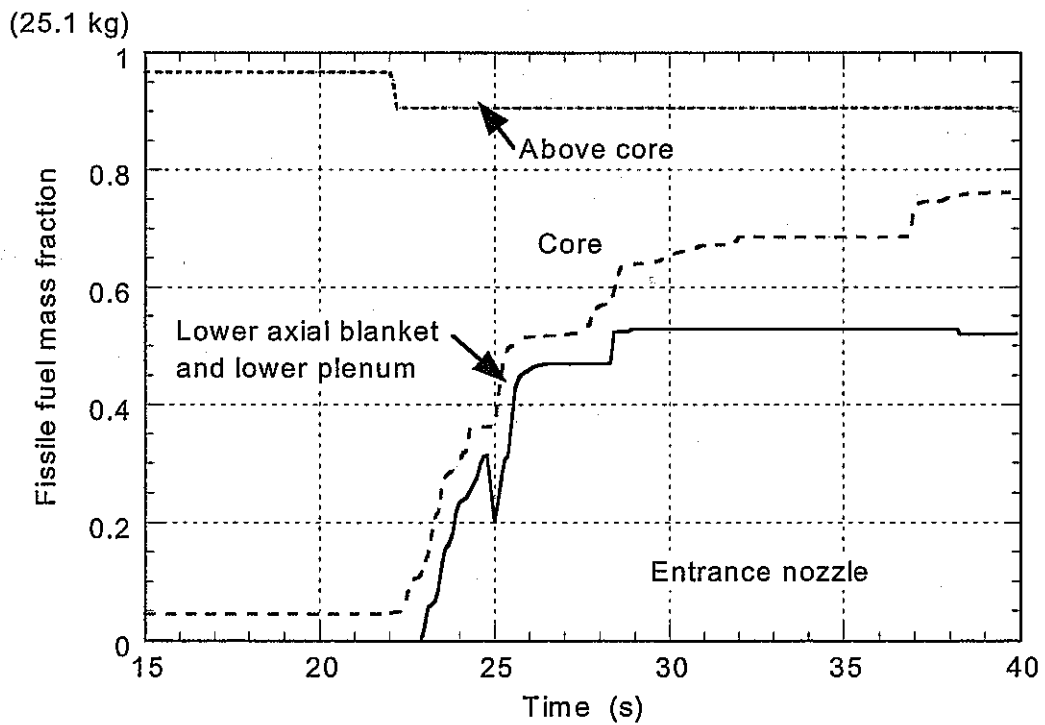


図 32 高増殖炉心における Fissile 燃料の分布 (集合体規模解析)

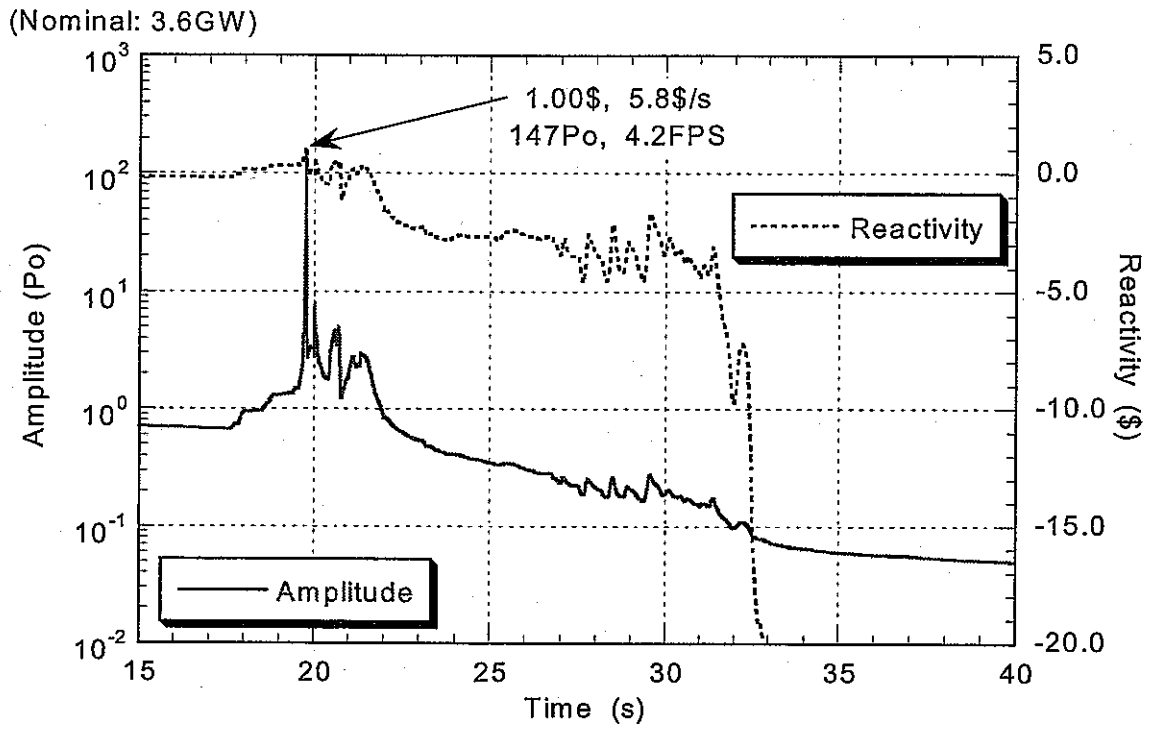


図 33 反応度及び規格化出力 (Bulk freezing model を用いた場合)

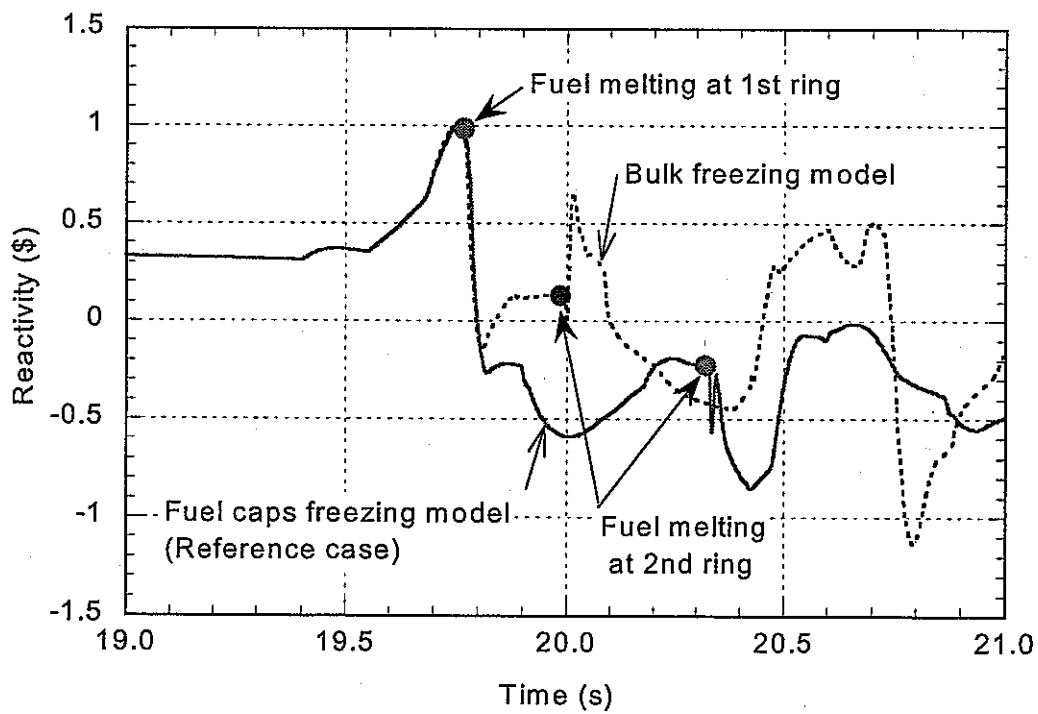


図 34 反応度履歴の比較

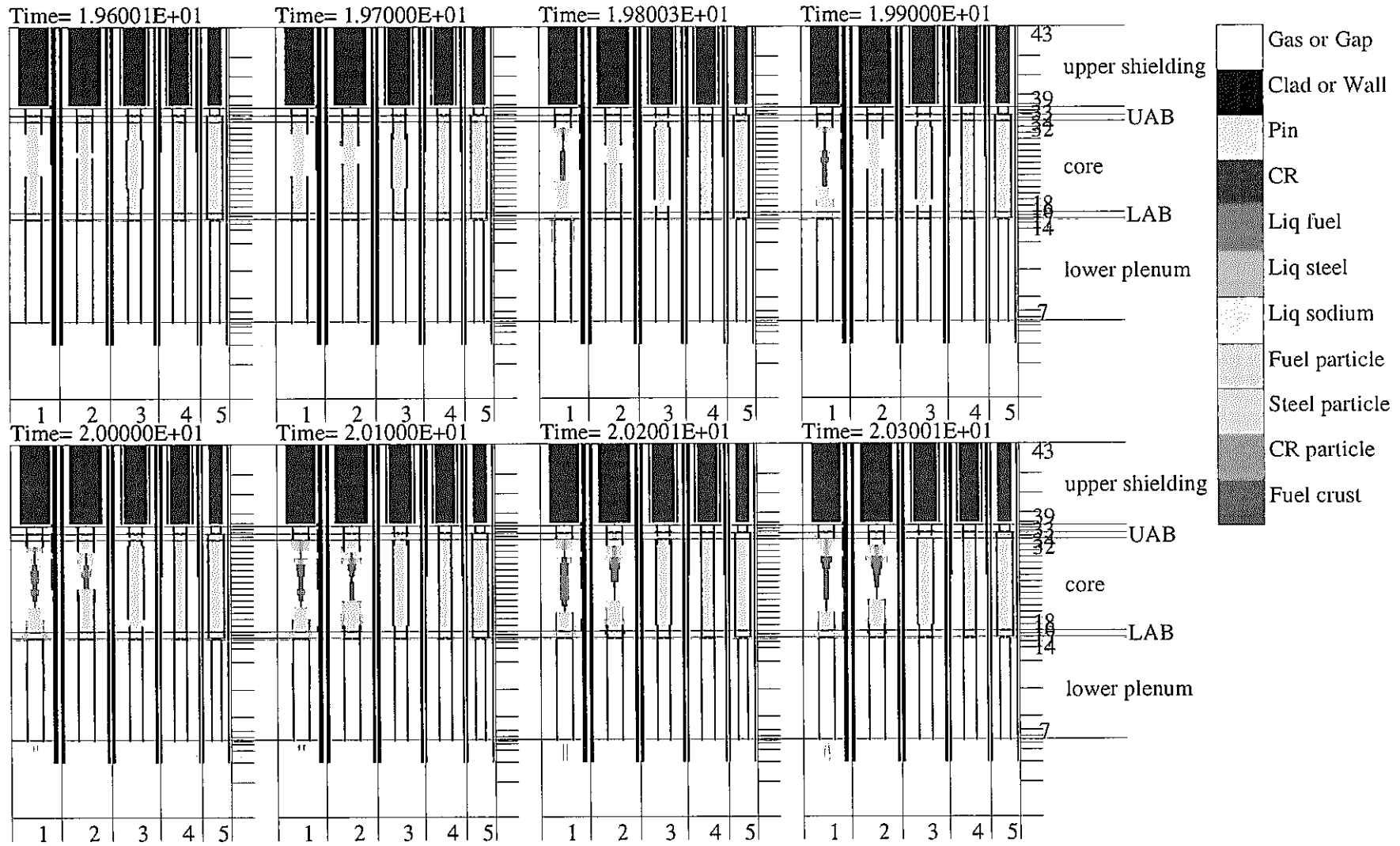


図 35 Bulk freezing model を用いた場合の物質分布 (1/4)

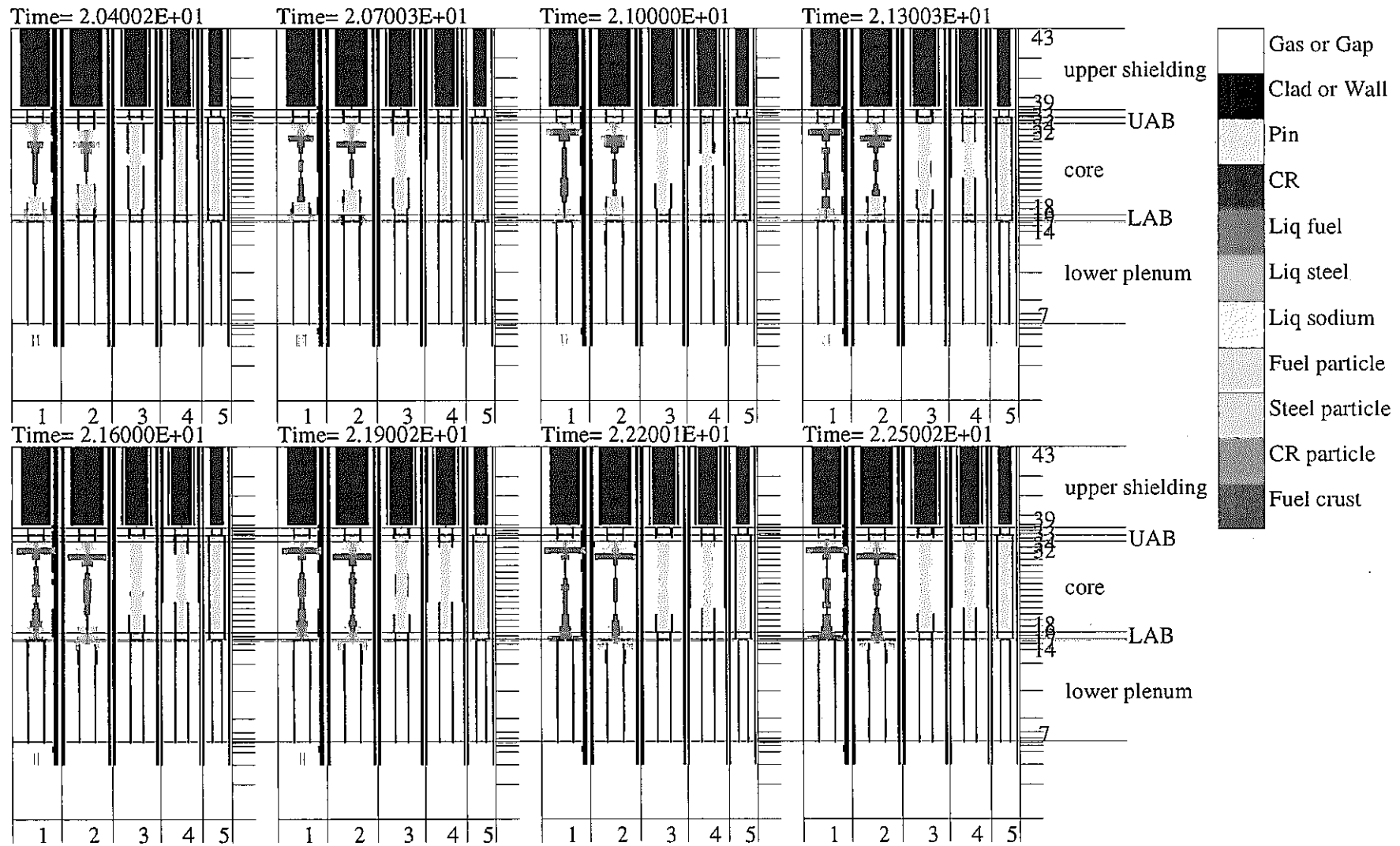


図 35 Bulk freezing model を用いた場合の物質分布 (2/4)

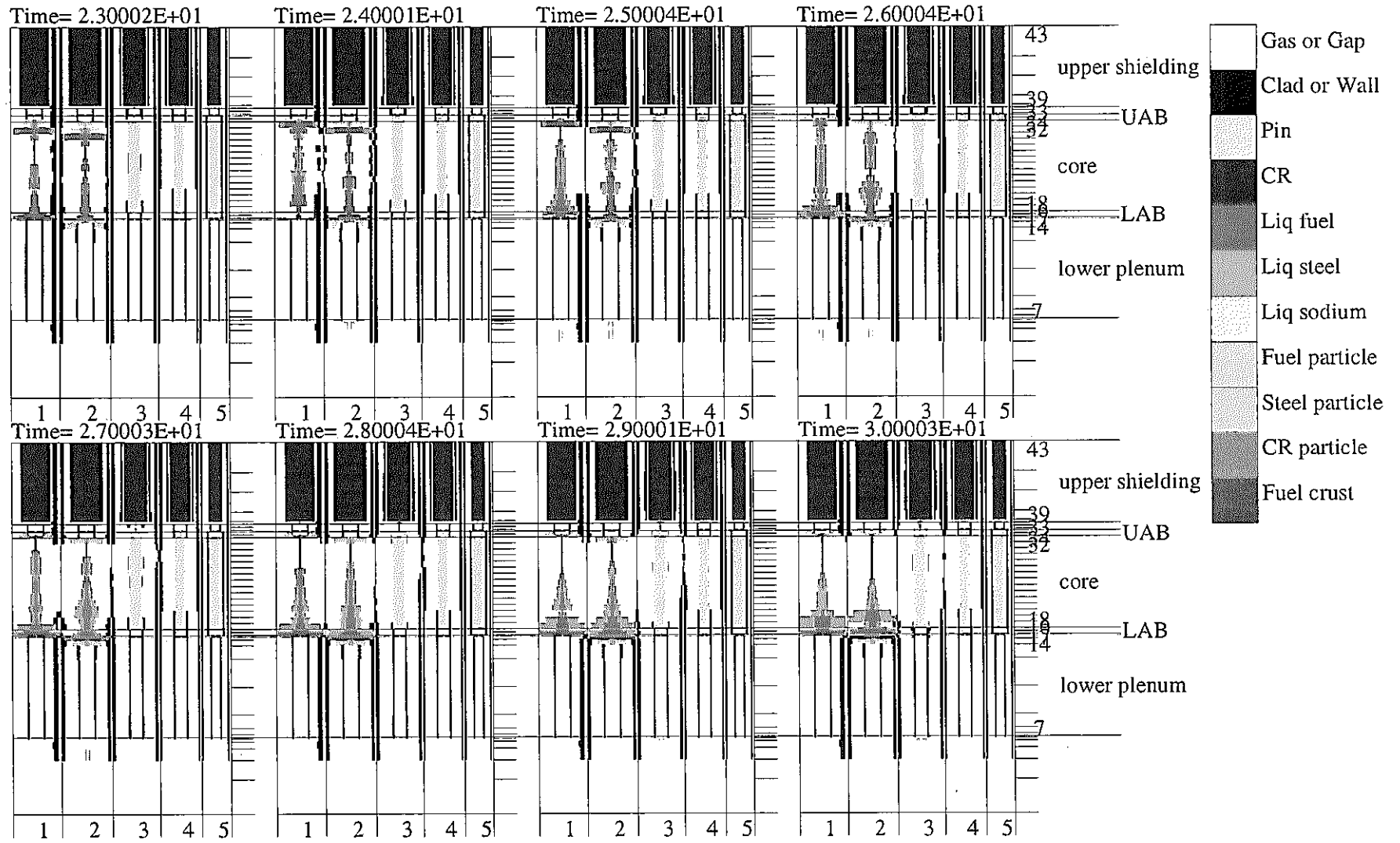


図 35 Bulk freezing model を用いた場合の物質分布 (3/4)

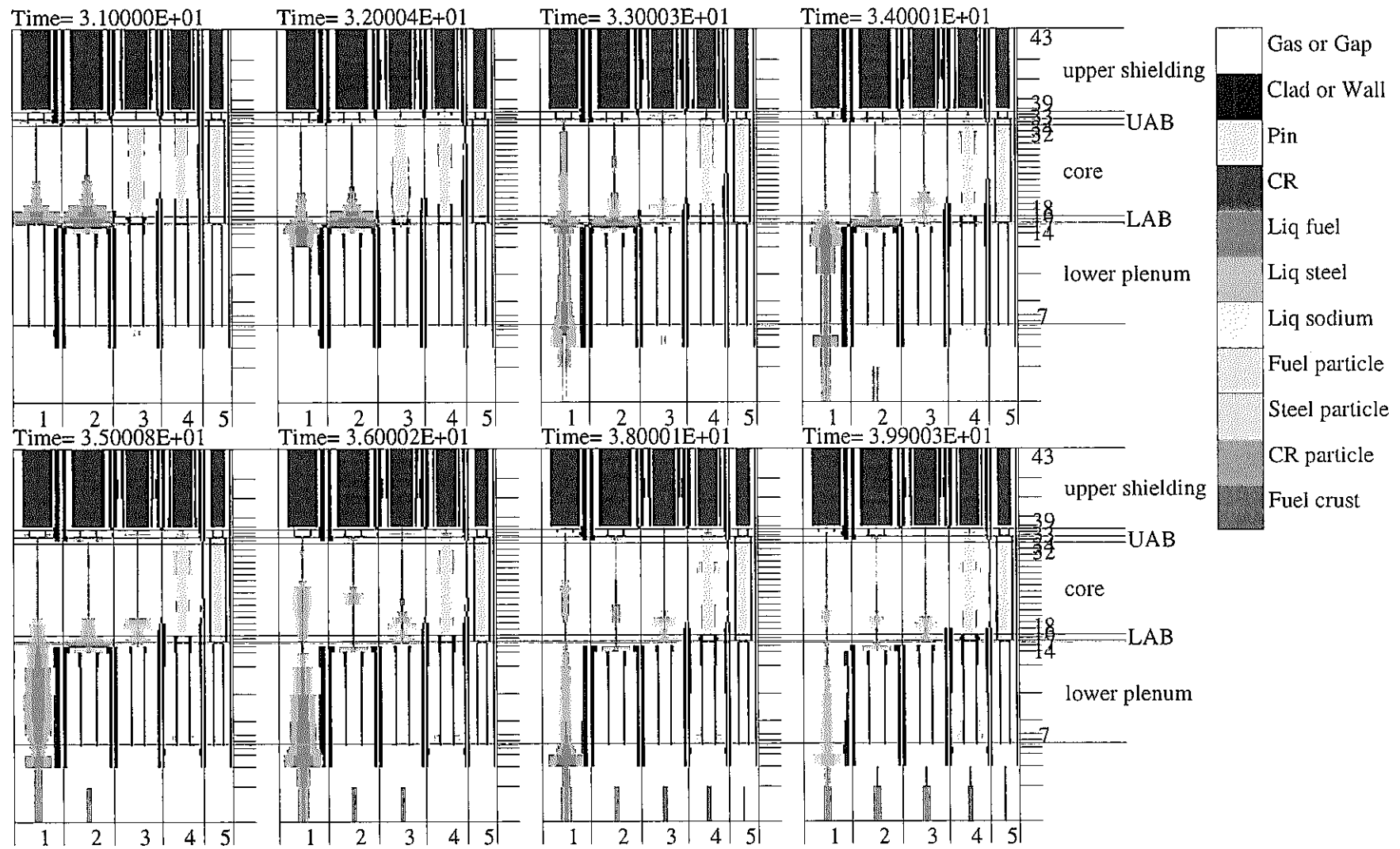


図 35 Bulk freezing model を用いた場合の物質分布 (4/4)

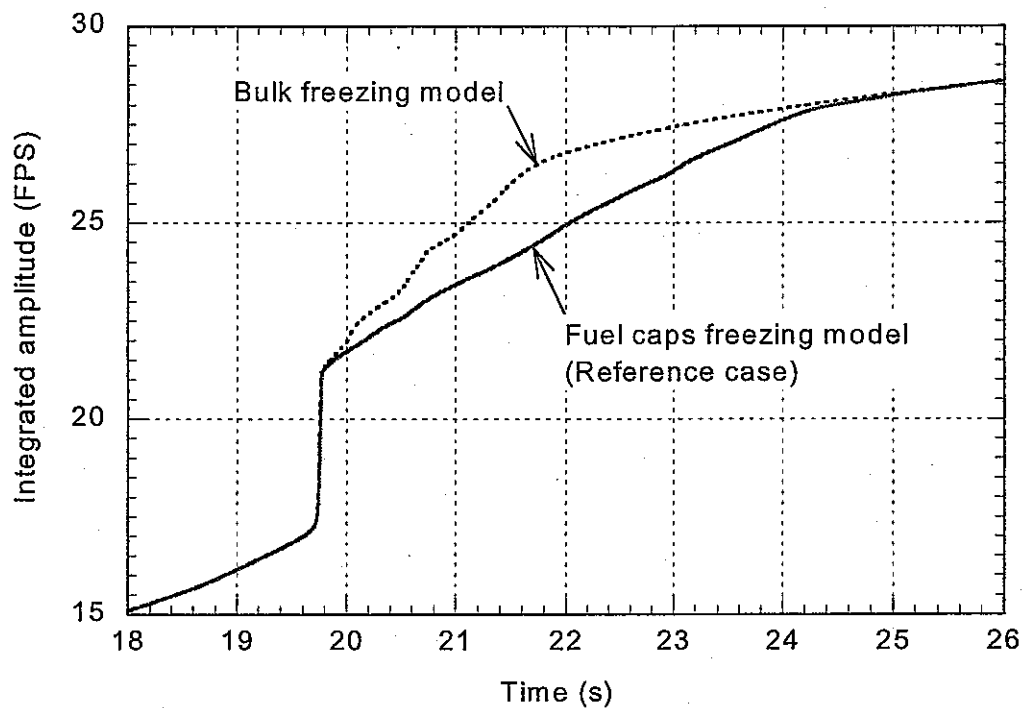


図 36 積算出力の比較

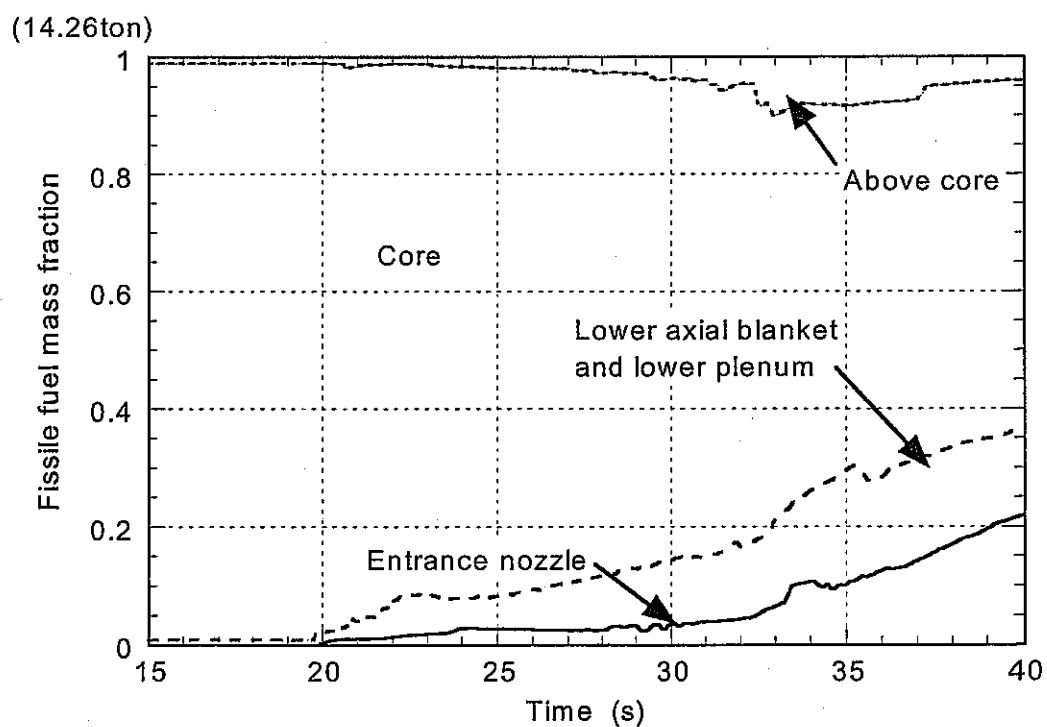


図 37 Fissile 燃料の分布 (Bulk freezing model を用いた場合)

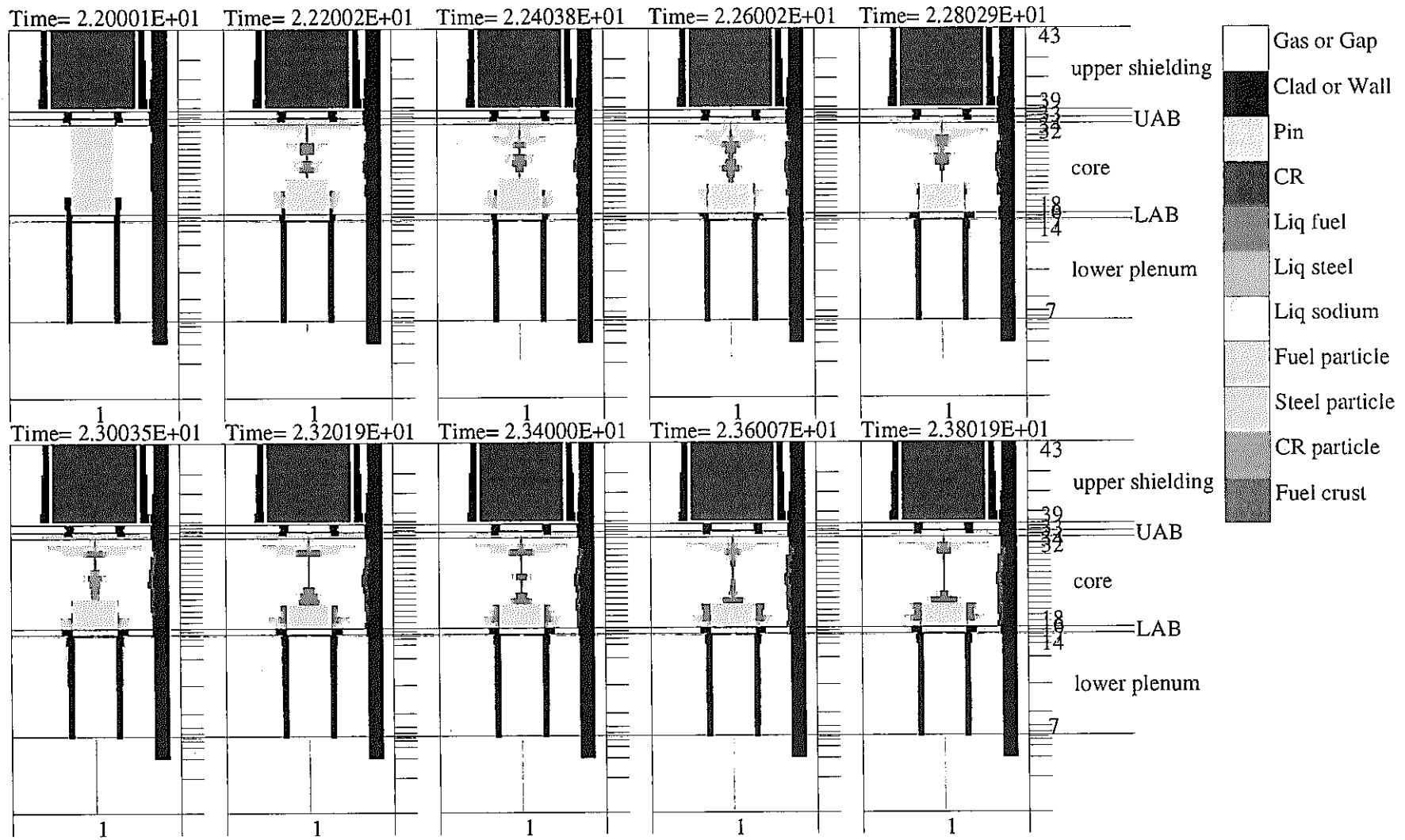


図 38 Bulk freezing model を用いた場合のリファレンス炉心における物質分布 (1/2)

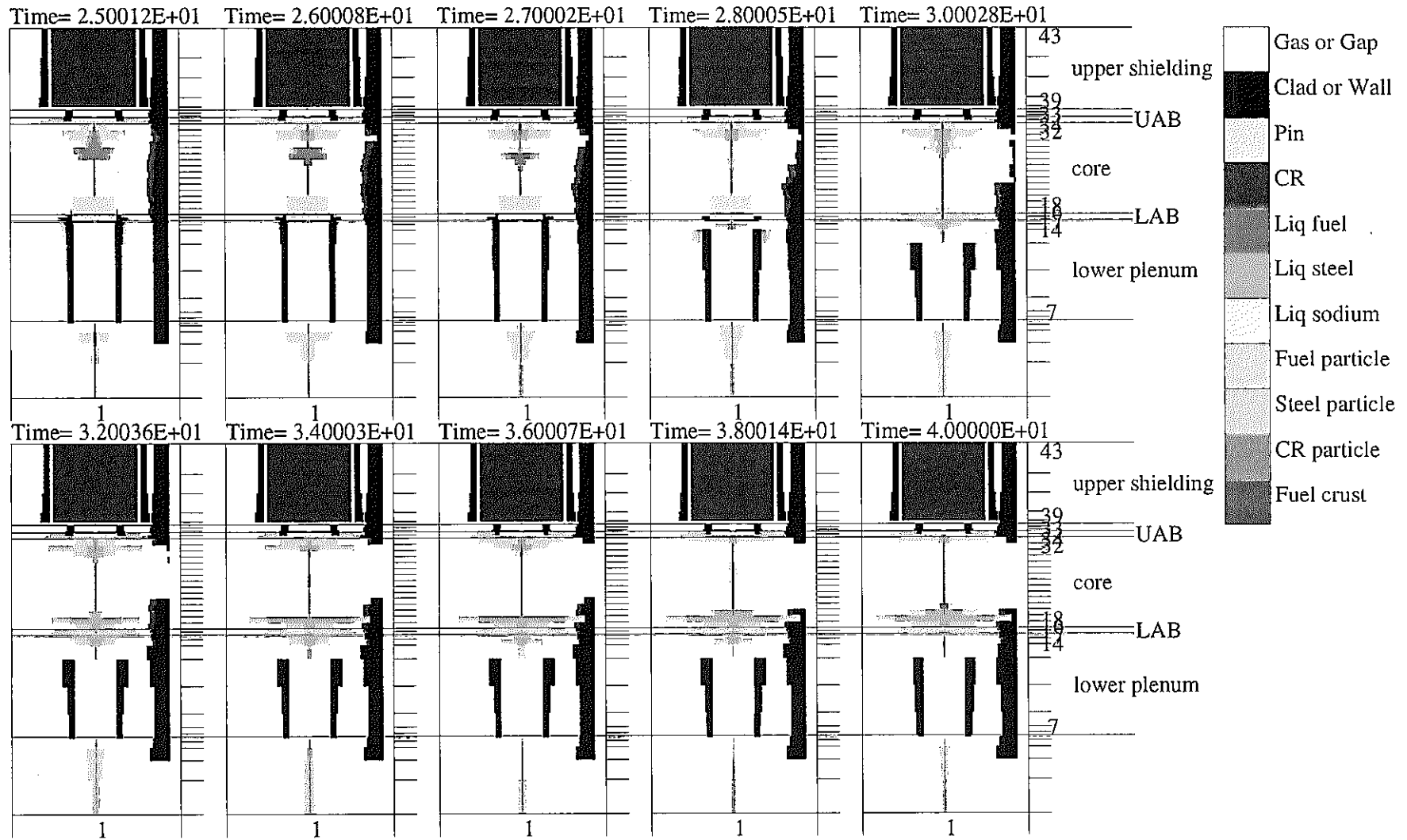


図 38 Bulk freezing model を用いた場合のリファレンス炉心における物質分布 (2/2)

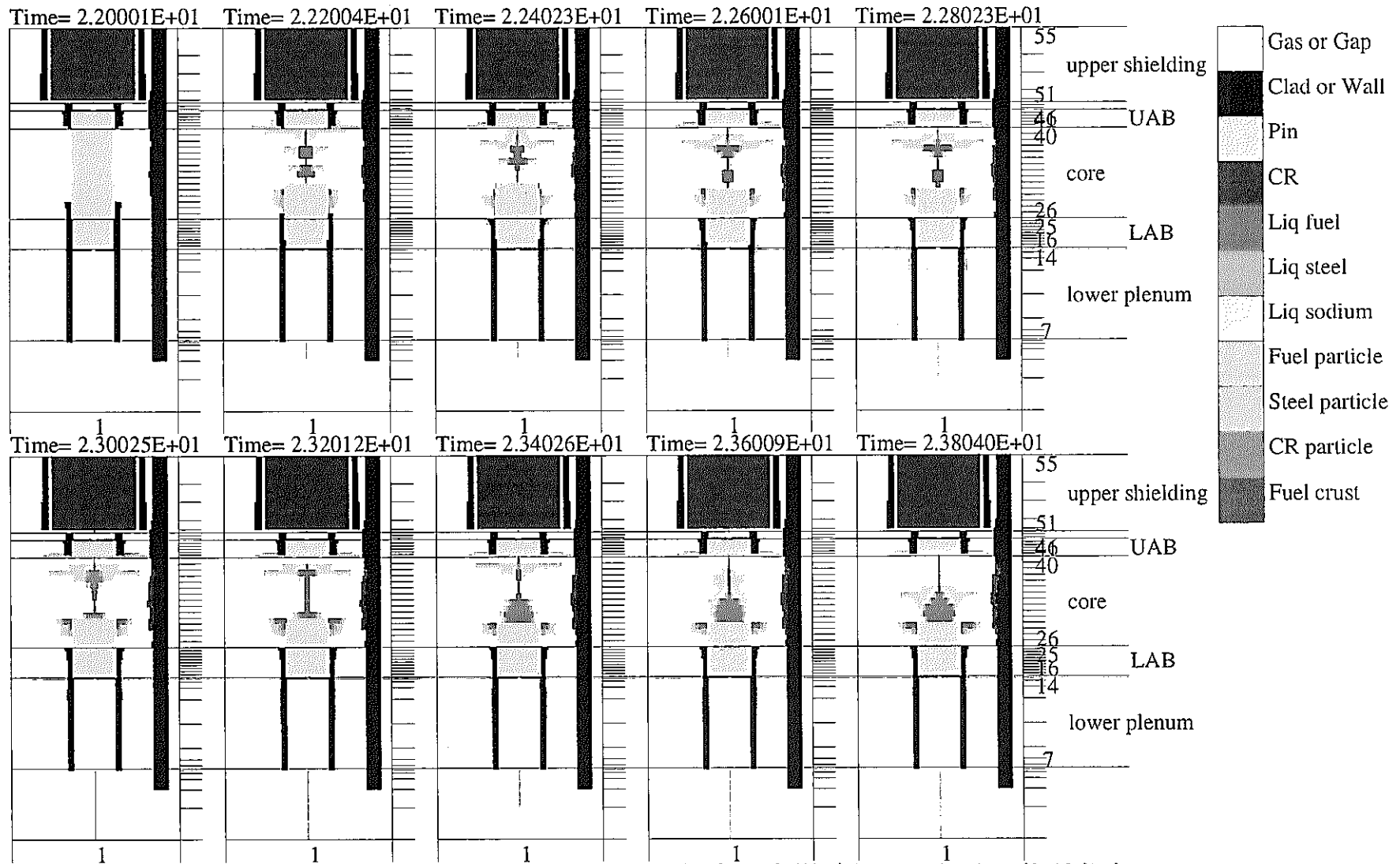


図 39 Bulk freezing model を用いた場合の高増殖炉心における物質分布 (1/2)

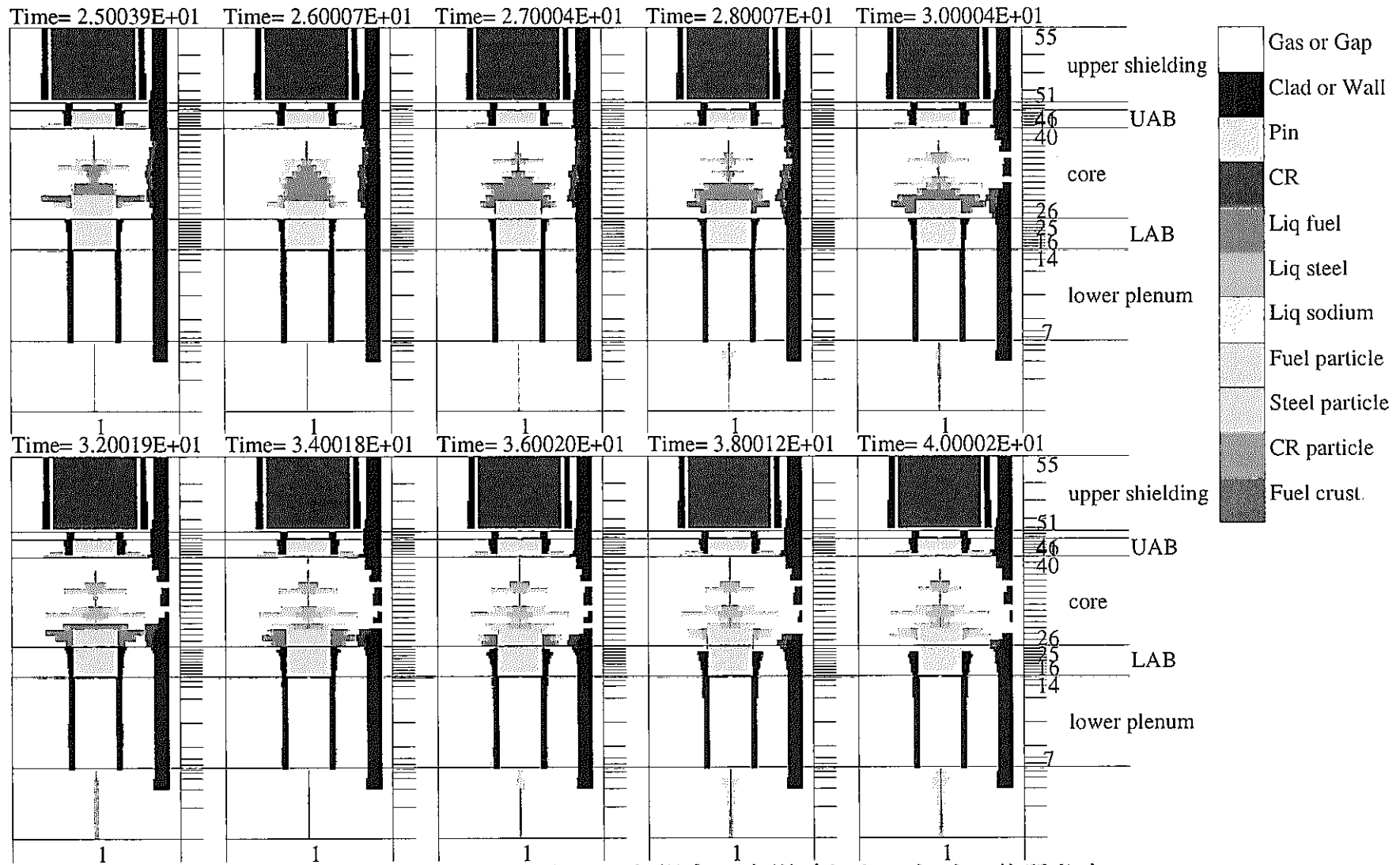


図 39 Bulk freezing model を用いた場合の高増殖炉心における物質分布 (2/2)

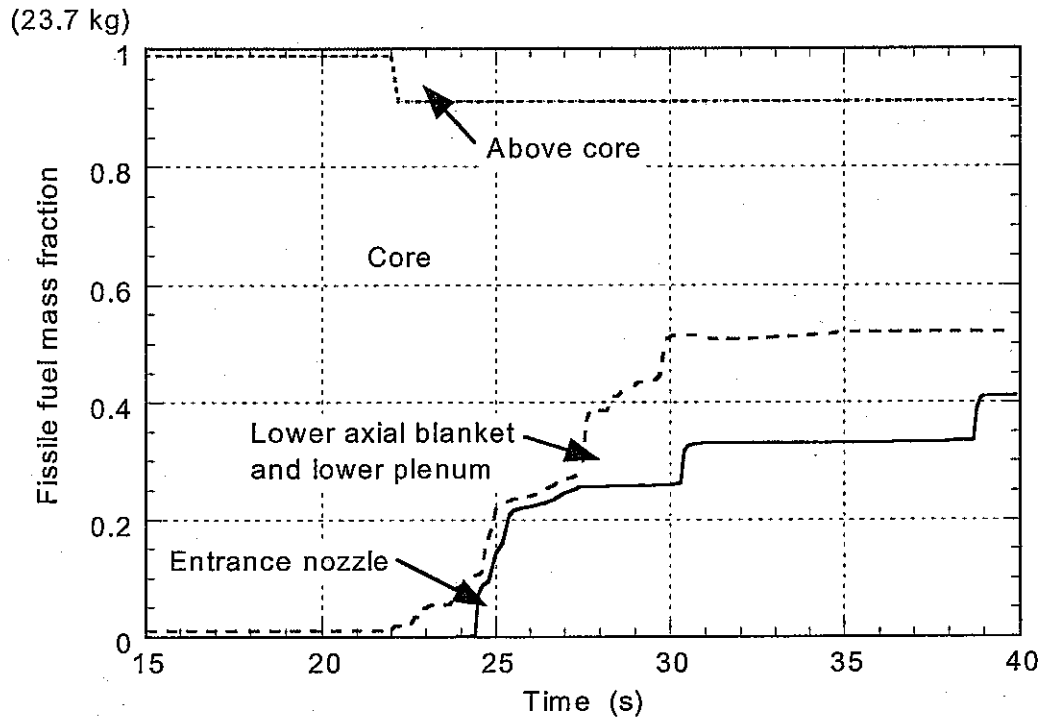


図 40 リファレンス炉心における Fissile 燃料の分布 (Bulk freezing model)

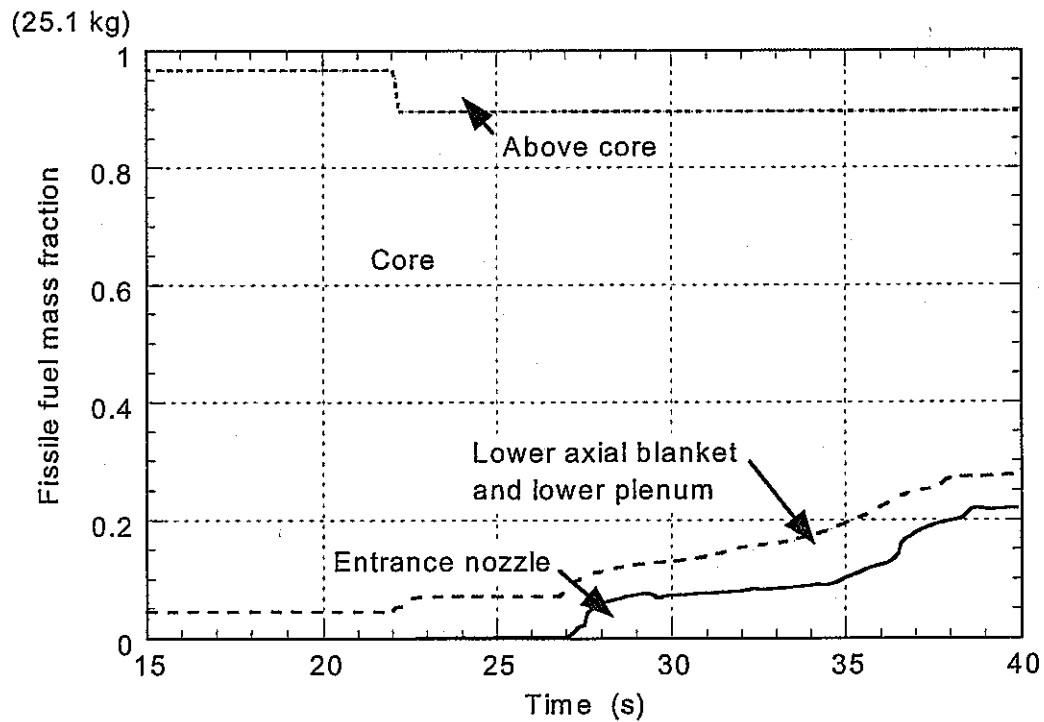


図 41 高増殖炉心における Fissile 燃料の分布 (Bulk freezing model)

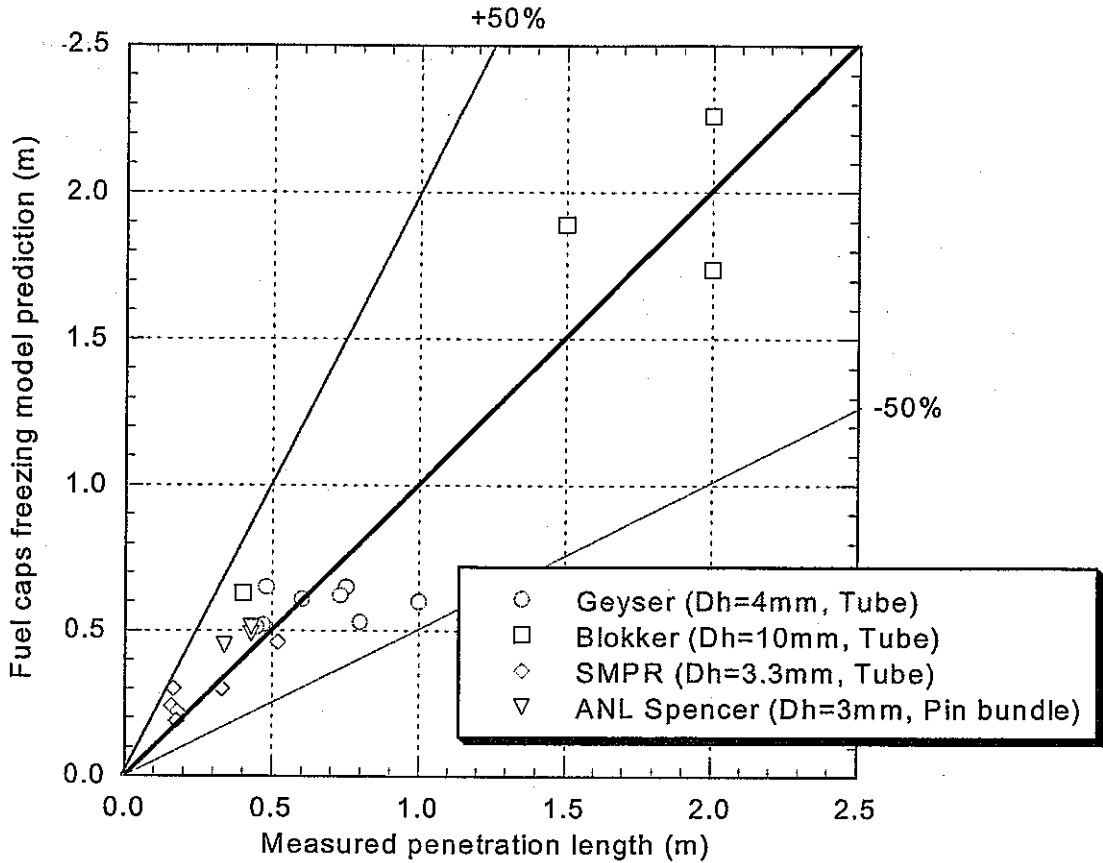


図 42 実験結果と Fuel caps freezing モデルによる予測値との比較

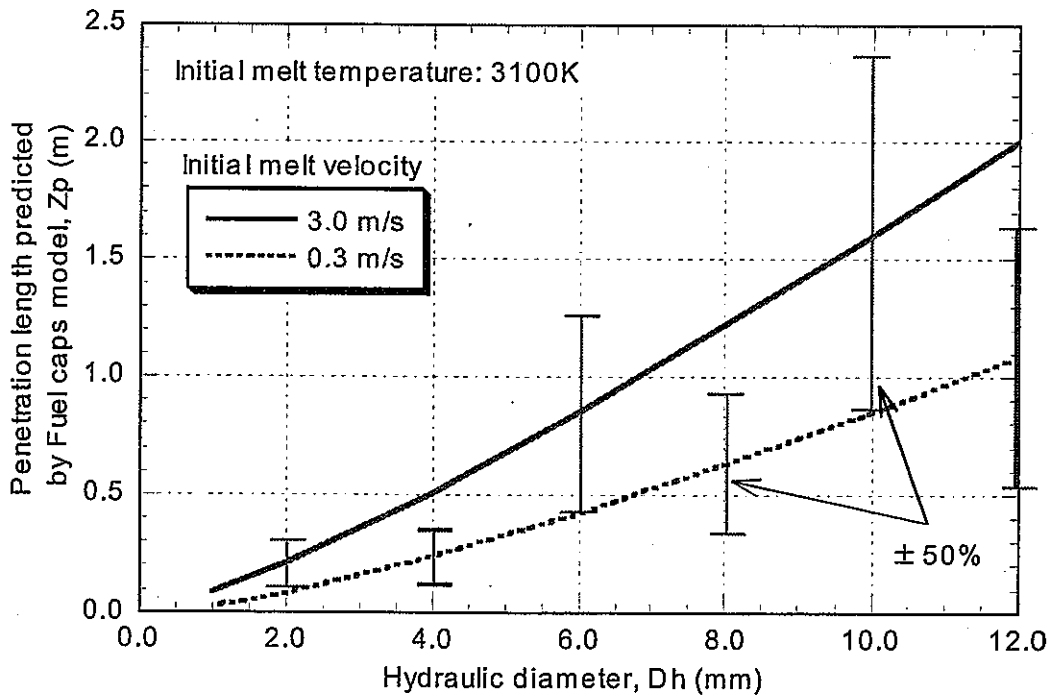


図 43 水力等価直径と融体侵入長の予測値との関係

付録 A 入力データの作成

1. 幾何形状

SIMMER-III では炉心を構成するピン束とラッパ管の幾何形状をそれぞれの体積率と単位体積当りの表面積としてモデル化する。

実際の炉心は、内側炉心に 12 リング(334 体)、外側炉心に 3 リング(216 体)、径ブランケットに 2 リング(186 体)の集合体を有しているが、SIMMER-III の解析では内側炉心を 4 リング毎 (37、117、180 集合体) に分け、径方向に 3 メッシュを割り当てた。このとき、制御棒集合体は無視した。径方向メッシュサイズは当該集合体の面積を円筒形状に換算した。

2. 冷却材物性値

炭酸ガスは理想気体として扱うから、状態方程式 (EOS) [A-1] には標準の解析モデル、熱物性値 (TPP) [A-2] には理論モデルを使用する。表 A-1 に冷却材物性値を示す。データは参考文献から参照しているが、基準エネルギー (ELIQGD) は、 $T_{ref}=298.15K$ として算出した。

3. 燃料ペレット

SIMMER-III の簡易燃料ピンモデルでは中空燃料は取り扱えないので、ここでは中心空孔を燃料内ポロシティの中に加えて計算を行った。固体燃料熱伝導率 [A-2] は次式で表される。

$$\kappa_{sm}^p = \kappa_{sm}(1 - \varepsilon_{sm})^{2.5}$$

したがって、ポロシティの増加分だけ固体燃料熱伝導率は低下するから、補正しなくてはならない。

4. 流動様式

ピン束内における流動化燃料の流動様式は foamy flow になると推測されている [A-3] ことより、本解析においても高いボイド率 ($\alpha_{Bub}=0.8$) でも気泡流になるように設定した。

5. 核計算

(a) Enrichment

表 A-2 に示すように、各領域における 30 核種の数密度データから、SIMMER-III に適合するように 5 成分 (Fertile, Fissile, Steel, Coolant, Control) に分類したが、炉心及びブランケット領域において ^{16}O だけは Fertile, Fissile 及び Coolant に含まれるので、次のように求めた。

- (1) CO_2 冷却材中の ^{16}O の数密度は、 ^{12}C の 2 倍に相当する。
- (2) Fertile(UO_2)中の ^{16}O の数密度は、U の 2 倍に相当する。
- (3) Fissile 中の ^{16}O の数密度は、残りに相当する。

以上の手順で、各領域における各成分の数密度を求め、それから各領域における Enrichment (XENRIB) を算出した。

(b) 核データ

核データとして ABBN 型の無限希釈断面積 (ISOTXS ファイル) と自己遮蔽因子 (BRKOXS ファイル) を入力とする。これらは JENDL3.2 ベースの 70 群基本核データライブラリ JFS3-J3 を基に、18 群に縮約したものである。その手順について以下に

述べる。

まず、各領域における構成各種の実効マイクロ断面積及び積分中性子束分布を求めるため、70 群核データライブラリを基に EXPANDA-GS コードにより 1 次元拡散計算を行った。計算は、図 A-1 に示す体系で、軸方向バックリング長 40cm を適用した。なお、各領域の構成各種及び原子数密度は表 A-2 に示すとおりである。

実効マイクロ断面積、積分中性子束分布及び 70 群核データライブラリを用いて、群縮約計算プログラムにより動特性パラメータ（遅発中性子割合、18 群遅発中性子スペクトル）を得ると同時に cccc 形式の ISOTXS 及び BRKOXS ファイルを作成した。このときの 18 群エネルギー構造は表 A-3 に示すとおりである。

次に、核定数ファイル作成コードにより両ファイルを cccc 形式からテキスト形式に変換した。併せて、表 A-4 に示すように、5 つの成分毎に入力データ用原子数密度を得た。その算出方法は、SIMMER-III の 100%理論密度を成分毎に構成される元素の巨視的密度の和で除したものに各核種の数密度を乗じたものの成分毎の和として求められる。

最後に、BINX コードによりテキスト形式からバイナリ形式に変換し、18 群 ISOTXS 及び BRKOXS ファイルを作成した。

参考文献

- [A-1] K. Morita et al., "SIMMER-III Analytic Equation-of-State Model," JNC report, JNC TN9400 2000-005 (May 1999).
- [A-2] K. Morita et al., "SIMMER-III Analytic Thermophysical Property Model," JNC report, JNC TN9400 2000-004 (May 1999).
- [A-3] 野中信之 他, "国際共同CABRI炉内試験計画の進展とその成果," Vol.82, pp.49, 動燃技報 (1992).
- [A-4] R. C. Reid, J. M. Prausnitz and B. E. Poling, "The Properties of Gases and Liquids," McGraw-Hill Book Company, pp.667 (1988).
- [A-5] E. L. Cussler, "Diffusion, mass transfer in fluid systems," Cambridge University Press, pp.105 (1997).
- [A-6] 日本機械学会, "技術資料 流体の熱物性値集," pp.202 (1982).

表 A-1 冷却材物性値

Variables	Input parameters	Data	Remarks
EOS			
—	ISAE	0	—
—	IMRK	0	—
Liquidus temperature T _{fp} (K)	TLIQ	216.6	Ref. [A-4]
Critical temperature T _c (K)	TCRIT	304.1	Ref. [A-4]
Molecular weight Mo/wt (g/mol)	W	44.010	Ref. [A-4]
Specific gas constant R (J/kg/K)	R	188.92	=8.31441/0.044010
Isobaric specific heat capacity C _p (J/kg/K)	—	1109.6	Ref. [A-6]
Isochoric specific heat capacity C _v (J/kg/K)	CVG	990.68	=C _p -R
Reference energy Eliq (J)	ELIQD	-8.07900D+4	=-C _v (T _{ref} -T _{fp})
TPP			
—	KPOPT	0	—
—	MUOPT	0	—
Lennard-Jones parameter ϵ/k_B (K)	EPSM	195.2	Ref. [A-5]
Lennard-Jones collision diameter σ (Å)	SIGM	3.941	Ref. [A-5]
Number of atom n	NATOM	3	—

表 A-2 各領域における原子数密度

No.	Nuclide	Inner core	Outer core	UAB	LAB	RB	Up. shielding	Lo. shielding	Component
1	²³⁵ U	6.18647E-06	6.72092E-06	9.89510E-06	1.05913E-05	1.17066E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	Fertile
2	²³⁶ U	9.65146E-07	6.55291E-07	1.08672E-06	9.30204E-07	7.03444E-07	0.00000E+00	0.00000E+00	
3	²³⁸ U	4.02599E-03	3.73801E-03	5.52844E-03	5.57025E-03	5.64548E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	
4	²³⁵ U-FP	3.88179E-06	2.63844E-06	3.67497E-06	3.16306E-06	2.29956E-06	0.00000E+00	0.00000E+00	
5	²³⁸ U-FP	5.35252E-05	3.97902E-05	2.30282E-05	1.86035E-05	1.12440E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	
6	²³⁸ Pu	1.59056E-05	2.40072E-05	1.35430E-07	9.09771E-08	4.33227E-08	0.00000E+00	0.00000E+00	Fissile
7	²³⁹ Pu	5.05352E-04	6.49091E-04	1.97041E-04	1.75915E-04	1.28380E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	
8	²⁴⁰ Pu	2.64296E-04	3.65893E-04	1.58867E-05	1.13918E-05	6.00054E-06	0.00000E+00	0.00000E+00	
9	²⁴¹ Pu	6.59984E-05	1.00051E-04	9.59483E-07	5.07355E-07	2.05830E-07	0.00000E+00	0.00000E+00	
10	²⁴² Pu	7.36005E-05	1.07616E-04	3.79292E-08	1.60614E-08	4.53111E-09	0.00000E+00	0.00000E+00	
11	²³⁹ Pu-FP	2.60592E-04	2.41446E-04	3.98368E-05	2.88606E-05	1.44682E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	
12	²⁴¹ Pu-FP	8.94600E-05	9.30662E-05	5.62348E-07	3.01124E-07	1.00323E-07	0.00000E+00	0.00000E+00	
13	²⁴¹ Am	1.96458E-05	3.28888E-05	4.55610E-08	2.42032E-08	9.96794E-09	0.00000E+00	0.00000E+00	
14	²⁴¹ Am-M	1.07051E-06	1.28987E-06	9.65271E-10	4.21086E-10	1.24983E-10	0.00000E+00	0.00000E+00	
15	²⁴³ Am	7.29584E-06	7.43552E-06	1.49313E-09	4.59382E-10	9.32210E-11	0.00000E+00	0.00000E+00	
16	²⁴² Cm	1.18257E-06	1.27983E-06	1.59889E-09	6.86814E-10	1.97853E-10	0.00000E+00	0.00000E+00	
17	²⁴³ Cm	8.48032E-08	6.58283E-08	5.14758E-11	1.75417E-11	3.66229E-12	0.00000E+00	0.00000E+00	
18	²⁴⁴ Cm	1.73509E-06	1.18027E-06	1.46478E-10	3.54083E-11	5.08976E-12	0.00000E+00	0.00000E+00	
19	²⁴⁵ Cm	1.16668E-07	5.63105E-08	5.26549E-12	9.96595E-13	1.03578E-13	0.00000E+00	0.00000E+00	
20	²³⁷ Np	1.43428E-06	1.14775E-06	7.07698E-07	5.85556E-07	3.65961E-07	0.00000E+00	0.00000E+00	
21	Fe	7.13448E-03	7.13448E-03	7.13448E-03	7.13448E-03	7.13448E-03	9.12047E-03	3.93331E-02	Steel
22	Mn	1.42745E-04	1.42745E-04	1.42745E-04	1.42745E-04	1.42745E-04	2.41368E-04	1.04093E-03	
23	Ni	3.21930E-03	3.21930E-03	3.21930E-03	3.21930E-03	3.21930E-03	1.79421E-03	7.73775E-03	
24	Mo	2.17684E-04	2.17684E-04	2.17684E-04	2.17684E-04	2.17684E-04	2.03256E-04	8.76567E-04	
25	Cr	2.39263E-03	2.39263E-03	2.39263E-03	2.39263E-03	2.39263E-03	2.55025E-03	1.09982E-02	
26	W	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
27	¹² C	2.74525E-04	2.74525E-04	2.74525E-04	2.74525E-04	2.74525E-04	1.32910E-02	1.39189E-04	
28	¹⁶ O	1.12347E-02	1.12669E-02	1.20739E-02	1.20739E-02	1.20739E-02	2.72239E-04	2.78378E-04	
29	¹⁰ B	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.21655E-02	0.00000E+00	Control
30	¹¹ B	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.04540E-02	0.00000E+00	

Detail of N(¹⁶ O)							
Coolant	5.49050E-04	5.49050E-04	5.49050E-04	5.49050E-04	5.49050E-04	1.36120E-04	1.39189E-04
Fertile	8.18110E-03	7.57563E-03	1.11322E-02	1.12071E-02	1.13429E-02	0.00000E+00	0.00000E+00
Fissile	2.50455E-03	3.14222E-03	3.92600E-04	3.17774E-04	1.81983E-04	0.00000E+00	0.00000E+00
Control	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.31549E-02	0.00000E+00

Number density [10^{24} atoms/cm ³]							
	Inner core	Outer core	UAB	LAB	RB	Up. shielding	Lo. shielding
Fertile	1.22716E-02	1.13634E-02	1.66984E-02	1.68106E-02	1.70143E-02	0.00000E+00	0.00000E+00
Fissile	3.81232E-03	4.76873E-03	6.47817E-04	5.35468E-04	3.31562E-04	0.00000E+00	0.00000E+00
Steel	1.31068E-02	1.31068E-02	1.31068E-02	1.31068E-02	1.31068E-02	1.39096E-02	5.99865E-02
Coolant	1.20583E-02	1.20905E-02	1.28975E-02	1.28975E-02	1.28975E-02	1.36994E-02	5.56756E-04
Control	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.57744E-02	0.00000E+00

Enrichment=(Fissile/(Fertile+Fissile))							
	Inner core	Outer core	UAB	LAB	RB	Up. shielding	Lo. shielding
	2.37026E-01	2.95604E-01	3.73464E-02	3.08697E-02	1.91148E-02	0.00000E+00	0.00000E+00

表 A-3 70 群及び 18 群エネルギー構造

70 group	18 group	Upper limit [eV]	Lower limit [eV]	70 group	18 group	Upper limit [eV]	Lower limit [eV]
1	1	1.00000E+7	7.78801E+6	36	14	1.58461E+3	1.23409E+3
2		7.78801E+6	6.06531E+6	37		1.23409E+3	9.61114E+2
3	2	6.06531E+6	4.72367E+6	38	15	9.61114E+2	7.48516E+2
4		4.72367E+6	3.67880E+6	39		7.48516E+2	5.82945E+2
5	3	3.67880E+6	2.86505E+6	40		5.82945E+2	4.53998E+2
6		2.86505E+6	2.23130E+6	41	16	4.53998E+2	3.53574E+2
7	4	2.23130E+6	1.73774E+6	42		3.53574E+2	2.75363E+2
8		1.73774E+6	1.35335E+6	43		2.75363E+2	2.14453E+2
9	5	1.35335E+6	1.05399E+6	44	17	2.14453E+2	1.67016E+2
10		1.05399E+6	8.20849E+5	45		1.67016E+2	1.30072E+2
11	6	8.20849E+5	6.39278E+5	46		1.30072E+2	1.01301E+2
12		6.39278E+5	4.97870E+5	47	18	1.01301E+2	7.88929E+1
13		4.97870E+5	3.87742E+5	48		7.88929E+1	6.14419E+1
14	7	3.87742E+5	3.01974E+5	49		6.14419E+1	4.78510E+1
15		3.01974E+5	2.35177E+5	50		4.78510E+1	3.72664E+1
16		2.35177E+5	1.83156E+5	51		3.72664E+1	2.90231E+1
17	8	1.83156E+5	1.42642E+5	52		2.90231E+1	2.26032E+1
18		1.42642E+5	1.11090E+5	53		2.26032E+1	1.76034E+1
19		1.11090E+5	8.65168E+4	54		1.76034E+1	1.37095E+1
20	9	8.65168E+4	6.73793E+4	55		1.37095E+1	1.06770E+1
21		6.73793E+4	5.24751E+4	56		1.06770E+1	8.31525E+0
22		5.24751E+4	4.08676E+4	57		8.31525E+0	6.47592E+0
23	10	4.08676E+4	3.18277E+4	58		6.47592E+0	5.04345E+0
24		3.18277E+4	2.47875E+4	59		5.04345E+0	3.92785E+0
25		2.47875E+4	1.93045E+4	60		3.92785E+0	3.05901E+0
26	11	1.93045E+4	1.50344E+4	61		3.05901E+0	2.38236E+0
27		1.50344E+4	1.17088E+4	62		2.38236E+0	1.85538E+0
28		1.17088E+4	9.11880E+3	63		1.85538E+0	1.44497E+0
29	12	9.11880E+3	7.10173E+3	64		1.44497E+0	1.12535E+0
30		7.10173E+3	5.53083E+3	65		1.12535E+0	8.76420E-1
31		5.53083E+3	4.30741E+3	66		8.76420E-1	6.82557E-1
32	13	4.30741E+3	3.35461E+3	67		6.82557E-1	5.31576E-1
33		3.35461E+3	2.61258E+3	68		5.31576E-1	4.13992E-1
34		2.61258E+3	2.03468E+3	69		4.13992E-1	3.22417E-1
35	14	2.03468E+3	1.58461E+3	70		3.22417E-1	1.00000E-5

表 A-4 混合成分毎の物質密度及び原子数密度

Component	Theoretical density (kg/m ³) THDENS	Number density (atom/barn-m) AVDENS
Fertile	9.80500E+03	6.52403E+00
Fissile	9.80500E+03	6.48338E+00
Steel	7.25600E+03	7.73394E+00
Coolant	3.27040E+03	1.34249E+02
Control	2.52000E+03	1.43459E+01

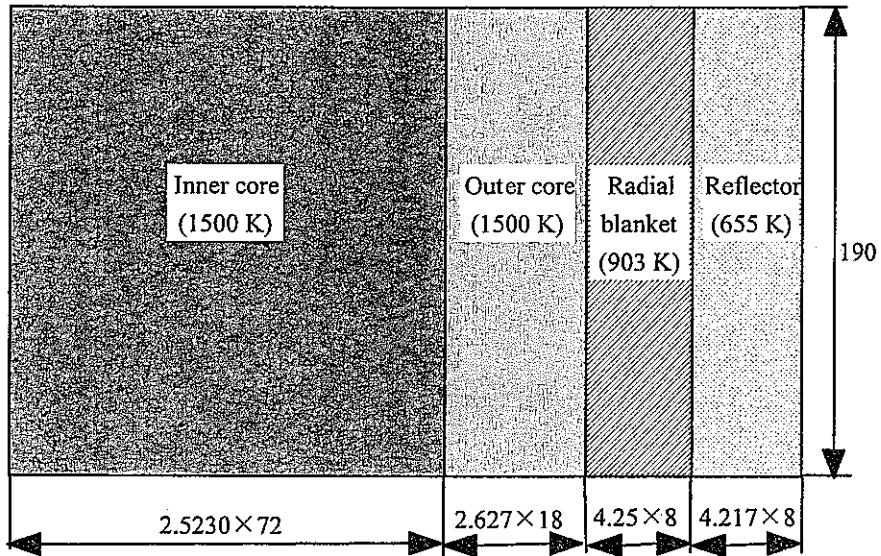


図 A-1 1次元拡散計算における解析体系

付録B 全炉心解析用入力データ

```

START CO2-MOX WHOLE CORE ACCIDENT          3.6000D+1, 3.8000D+1,          ANFIRB =5.46000D-02,
WITH SIMMER-III VERSION 2.G (CSF09)         4.0000D+1, 4.5000D+1,          ASMINB(4)=6.14000D-02,
                                              5.0000D+1, 5.5000D+1,          ANFIPB =2.54000D-01,
                                              6.0000D+1, 6.0000D+1,          RPINIB =4.10000D-03,
                                              1.0000D+3,          TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
&XCNTL                                       &END                                     TSINB(4) =5.1315D+2,
ERROPT(2)=1,                                # For steady-state calculation       TGINB =5.1315D+2,
EDTOPT(20)=9,                                LBCP=2,                               PG4INB =4.2000D+6,
EDTOPT(51)=1,                                PTAB(1)=5.7000D+6, 5.7000D+6,         ILSOIB=7,
HMTOPT(46)=1,                                PTME(1)=0.0000D+0, 3.0000D+1,         &END
HMTOPT(51)=1,1,0,0,
HMTOPT(66)=3,
HMTOPT(71)=1,1,1,1,
HMTOPT(80)=1,3,1,
&END
MXFOPT(90)=1,
ALGOPT(24)=2,
ALGOPT(30)=1,
EOSOPT(10)=1,
RSTOPT(2)=1,
&XMSH
IB=5,JB=50,
DRINP(1)=5.76810D-1, 5.99963D-1,
5.56254D-1,
4.90864D-1, 3.48702D-1,
DZINP(1)= 5.00D-1, 3.00D-1,
1.80D-1, 1.00D-1,
5.00D-2,
4.50D-2,
5.00D-2, 1.00D-1, 2.00D-1,
4.00D-1,
4.00D-1, 2.00D-1, 1.00D-1,
5.00D-2,
2.50D-2,
2*5.00D-2,
15*1.00D-1,
2*5.00D-2,
3.50D-2,
2*6.00D-2,
4.50D-2,
6.00D-2,
1.50D-1, 3.00D-1, 3.00D-1,
4.50D-1,
5.00D-1, 2.55D-1,
5.00D-1, 1.00D-0, 2.00D-0,
4.00D-0, 2.50D-0,
ICL = 1, ICR = 5, JCB = 1, JCT = 38,
JLPB = 7, JLPT = 14, JUPB = 36, JUPT = 37,
&END
&XTME
TWFIN =3.00D+01, DTSTRT=1.00D-05,
DTMIN =1.00D-07, DTMAX =1.00D-02,
DTHMIN=1.00D-03, DTHMAX=1.00D+00,
DTHINI=1.00D-03,
NBT0 =10, TCPU =1.00D+10,
&END
&XBND
NBC=0,
LBCSET(1)= 0, 0,0,0,0,0, 0,
0, 0,0,0,0,0, 1,
336*0,
0, 0,0,0,0,0, 2,
0, 0,0,0,0,0, 0,
&END
&XBND
NBC=1,
LBCS=3,
LBCG=-1,
LBCP=15,
PTAB(1)=5.7000D+6, 5.1292D+6,
4.7886D+6, 4.5679D+6,
4.4162D+6, 4.3070D+6,
4.2256D+6, 4.1141D+6,
4.0430D+6, 3.9463D+6,
3.8996D+6, 3.8732D+6,
3.8568D+6, 3.8382D+6,
3.8051D+6,
PTME(1)=3.0000D+1, 3.1000D+1,
3.2000D+1, 3.3000D+1,
3.4000D+1, 3.5000D+1,
&END
&XBND
NBC=2,
LBCS=3,
LBCG=-1,
LBCP=2,
PTAB(1)=3.8000D+6, 3.8000D+6,
PTME(1)=0.0000D+0, 1.0000D+3,
&END
&XRCN
RGNAMB='ENTRANCE NOZZLE 1',
LRGN=1,ILB=1,IUB=1,JLB=1,JUB=2,
ASMINB(4)=8.30000D-05,
ANFIPB =2.70000D-05,
RPINIB =1.00000D-03,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =5.7000D+6,
ILSOIB=7,
&END
&XRCN
RGNAMB='ENTRANCE NOZZLE 2',
LRGN=2,ILB=2,IUB=5,JLB=1,JUB=2,
ASMINB(4)=8.34000D-05,
ANFIPB =2.78000D-05,
RPINIB =1.00000D-03,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =5.7000D+6,
ILSOIB=7,
&END
&XRCN
RGNAMB='BOTTOM OF CORE 1',
LRGN=3,ILB=1,IUB=1,JLB=3,JUB=5,
ASMINB(4)=8.34000D-05,
ANFIPB =2.78000D-05,
RPINIB =1.00000D-03,
ASMINB(8)=9.23000D-02,
ARCWIB =2.04000D+01,
ANFIRB =5.46000D-02,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END
&XRCN
RGNAMB='BOTTOM OF CORE 2',
LRGN=4,ILB=2,IUB=5,JLB=3,JUB=5,
ASMINB(4)=8.34000D-05,
ANFIPB =2.78000D-05,
RPINIB =1.00000D-03,
ASMINB(6)=4.61000D-02,
ASMINB(8)=4.61000D-02,
ALCWIB =1.02000D+01,
ARCWIB =1.02000D+01,
ANFILB =2.73000D-02,
ANFIRB =2.73000D-02,
TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END
&XRCN
RGNAMB='BOTTOM OF PIN 1',
LRGN=5,ILB=1,IUB=1,JLB=6,JUB=6,
ASMINB(8)=9.23000D-02,
ARCWIB =2.04000D+01,
ANFIRB =5.46000D-02,
ASMINB(4)=6.14000D-02,
ANFIPB =2.54000D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
&END
&XRCN
RGNAMB='BOTTOM OF PIN 2',
LRGN=6,ILB=2,IUB=5,JLB=6,JUB=6,
ASMINB(5)=4.61000D-02,
ASMINB(8)=4.61000D-02,
ALCWIB =1.02000D+01,
ARCWIB =1.02000D+01,
ANFILB =2.73000D-02,
ANFIRB =2.73000D-02,
ASMINB(4)=6.14100D-02,
ANFIPB =2.54500D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END
&XRCN
RGNAMB='LOWER PLENUM 1',
LRGN=7,ILB=1,IUB=1,JLB=7,JUB=14,
ASMINB(8)=9.23000D-02,
ARCWIB =2.04000D+01,
ANFIRB =5.46000D-02,
ASMINB(4)=6.14000D-02,
ANFIPB =2.54000D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
TGLB =5.1315D+2,
PGLB =4.2000D+6,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END
&XRCN
RGNAMB='LOWER PLENUM 2',
LRGN=8,ILB=2,IUB=5,JLB=7,JUB=14,
ASMINB(6)=4.61000D-02,
ASMINB(8)=4.61000D-02,
ALCWIB =1.02000D+01,
ARCWIB =1.02000D+01,
ANFILB =2.73000D-02,
ANFIRB =2.73000D-02,
ASMINB(4)=6.14000D-02,
ANFIPB =2.54000D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
TGLB =5.1315D+2,
PGLB =4.2000D+6,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END
&XRCN
RGNAMB='LOWER CONNECTOR 1',
LRGN=9,ILB=1,IUB=1,JLB=15,JUB=15,
ASMINB(8)=9.23000D-02,
ARCWIB =2.04000D+01,
ANFIRB =5.46000D-02,
ASMINB(4)=2.97000D-01,
ANFIPB =1.87000D-02,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,

```

```

TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB   =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='LOWER CONNECTOR 2',
LRGN=10, ILB=2, IUB=5, JLB=15, JUB=15,
  ASMINB(6)=4.61000D-02,
  ASMINB(8)=4.61000D-02,
  ALCWIB  =1.02000D+01,
  ARCWIB  =1.02000D+01,
  ANFILB  =2.73000D-02,
  ANFIRB  =2.73000D-02,
  ASMINB(4)=2.97000D-01,
  ANFIPB  =1.87000D-02,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='LOWER BLANKET 1',
LRGN=11, ILB=1, IUB=1, JLB=16, JUB=17,
  ASMINB(8)=9.23000D-02,
  ARCWIB  =2.04000D+01,
  ANFIRB  =5.46000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=5.00000D-02,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =5.1315D+2,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =5.1315D+2,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=3.08697D-02,
  XFIBN   =2.66900D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='LOWER BLANKET 2',
LRGN=12, ILB=2, IUB=4, JLB=16, JUB=17,
  ASMINB(6)=4.61000D-02,
  ASMINB(8)=4.61000D-02,
  ALCWIB  =1.02000D+01,
  ARCWIB  =1.02000D+01,
  ANFILB  =2.73000D-02,
  ANFIRB  =2.73000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=5.00000D-02,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =5.1315D+2,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =5.1315D+2,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=3.08697D-02,
  XFIBN   =2.66900D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='INNER CORE 1',
LRGN=13, ILB=1, IUB=1, JLB=18, JUB=32,
  ASMINB(8)=9.23000D-02,
  ARCWIB  =2.04000D+01,
  ANFIRB  =5.46000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =5.59000D-03,
  RPINIB  =5.40000D-03,
  EPSFIB(1)=5.00000D-02,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =5.1315D+2,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=1.25061D-01,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =1.50015D+3,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =1.50015D+3,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=2.37026D-01,
  XFIBN   =3.63615D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='INNER CORE 2',
LRGN=14, ILB=2, IUB=3, JLB=18, JUB=32,
  ASMINB(6)=4.61000D-02,
  ASMINB(8)=4.61000D-02,
  ALCWIB  =1.02000D+01,
  ARCWIB  =1.02000D+01,
  ANFILB  =2.73000D-02,
  ANFIRB  =2.73000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=1.25061D-01,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =1.50015D+3,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =1.50015D+3,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=2.37026D-01,
  XFIBN   =3.63615D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='OUTER CORE',
LRGN=15, ILB=4, IUB=4, JLB=18, JUB=32,
  ASMINB(6)=4.61000D-02,
  ASMINB(8)=4.61000D-02,
  ALCWIB  =1.02000D+01,
  ARCWIB  =1.02000D+01,
  ANFILB  =2.73000D-02,
  ANFIRB  =2.73000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=1.25061D-01,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =1.50015D+3,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =1.50015D+3,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=2.95604D-01,
  XFIBN   =3.63615D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='RADIAL BLANKET',
LRGN=16, ILB=5, IUB=5, JLB=16, JUB=34,
  ASMINB(6)=4.61000D-02,
  ASMINB(8)=4.61000D-02,
  ALCWIB  =1.02000D+01,
  ARCWIB  =1.02000D+01,
  ANFILB  =2.73000D-02,
  ANFIRB  =2.73000D-02,
  ASMINB(1)=4.60000D-01,
  ASMINB(4)=8.19000D-02,
  ANFIPB  =5.59000D-03,
  RPINIB  =5.40000D-03,
  EPSFIB(1)=5.00000D-02,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =5.1315D+2,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =5.1315D+2,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=3.73464D-02,
  XFIBN   =2.66900D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='UPPER BLANKET 1',
LRGN=17, ILB=1, IUB=1, JLB=33, JUB=34,
  ASMINB(8)=9.23000D-02,
  ARCWIB  =2.04000D+01,
  ANFIRB  =5.46000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=5.00000D-02,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =5.1315D+2,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =5.1315D+2,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=3.73464D-02,
  XFIBN   =2.66900D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='UPPER BLANKET 2',
LRGN=18, ILB=2, IUB=4, JLB=33, JUB=34,
  ASMINB(6)=4.61000D-02,
  ASMINB(8)=4.61000D-02,
  ALCWIB  =1.02000D+01,
  ARCWIB  =1.02000D+01,
  ANFILB  =2.73000D-02,
  ANFIRB  =2.73000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=5.00000D-02,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =5.1315D+2,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =5.1315D+2,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=3.73464D-02,
  XFIBN   =2.66900D-03,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='UPPER CONNECTOR 1',
LRGN=19, ILB=1, IUB=1, JLB=35, JUB=35,
  ASMINB(8)=9.23000D-02,
  ARCWIB  =2.04000D+01,
  ANFIRB  =5.46000D-02,
  ASMINB(4)=2.97000D-01,
  ANFIPB  =1.87000D-02,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  ILSOIB=7,
&END

&XRGN
  RGNAMB='UPPER CONNECTOR 2',
LRGN=20, ILB=2, IUB=5, JLB=35, JUB=35,
  ASMINB(6)=4.61000D-02,
  ASMINB(8)=4.61000D-02,
  ALCWIB  =1.02000D+01,
  ARCWIB  =1.02000D+01,
  ANFILB  =2.73000D-02,
  ANFIRB  =2.73000D-02,
  ASMINB(1)=2.50000D-01,
  ASMINB(4)=6.14000D-02,
  ANFIPB  =5.59000D-03,
  RPINIB  =5.40000D-03,
  EPSFIB(1)=5.00000D-02,
  TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =5.1315D+2,
  ANFIPB  =4.13000D-03,
  RPINIB  =4.10000D-03,
  EPSFIB(1)=1.25061D-01,
  TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
  TSINB(1) =1.50015D+3,
  TSINB(4) =5.1315D+2,
  TSINTB  =1.50015D+3,
  TGINB   =5.1315D+2,
  PG4INB =4.2000D+6,
  XENRIB(1)=2.37026D-01,
  XFIBN   =3.63615D-03,
  ILSOIB=7,
&END

```

```

ASMINB(4)=2.97000D-01,
ANFIPB =1.87000D-02,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
RGNAMB='UPPER PLENUM 1',

LRGN=21, ILB=1, IUB=1, JLB=36, JUB=37,
ASMINB(8)=9.23000D-02,
ARCWIB =2.04000D+01,
ANFIRB =5.46000D-02,
ASMINB(4)=6.14000D-02,
ANFIPB =2.54000D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
TGUB =5.1315D+2,
PGUB =4.2000D+6,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
RGNAMB='UPPER PLENUM 2',

LRGN=22, ILB=2, IUB=5, JLB=36, JUB=37,
ASMINB(6)=4.61000D-02,
ASMINB(8)=4.61000D-02,
ALCWIB =1.02000D+01,
ARCWIB =1.02000D+01,
ANFILE =2.73000D-02,
ANFIRB =2.73000D-02,
ASMINB(4)=6.14000D-02,
ANFIPB =2.54000D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
TGUB =5.1315D+2,
PGUB =4.2000D+6,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
RGNAMB='TOP OF PIN 1',

LRGN=23, ILB=1, IUB=1, JLB=38, JUB=38,
ASMINB(8)=9.23000D-02,
ARCWIB =2.04000D+01,
ANFIRB =5.46000D-02,
ASMINB(4)=6.14000D-02,
ANFIPB =2.54000D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
RGNAMB='TOP OF PIN 2',

LRGN=24, ILB=2, IUB=5, JLB=38, JUB=38,
ASMINB(6)=4.61000D-02,
ASMINB(8)=4.61000D-02,
ALCWIB =1.02000D+01,
ARCWIB =1.02000D+01,
ANFILE =2.73000D-02,
ANFIRB =2.73000D-02,
ASMINB(4)=6.14000D-02,
ANFIPB =2.54000D-01,
RPINIB =4.10000D-03,
TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(4) =5.1315D+2,

TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
RGNAMB='LIFTING HEAD 1',

LRGN=29, ILB=1, IUB=1, JLB=44, JUB=45,
ASMINB(8)=9.23000D-02,
ARCWIB =2.04000D+01,
ANFIRB =5.46000D-02,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
RGNAMB='LIFTING HEAD 2',

LRGN=30, ILB=2, IUB=5, JLB=44, JUB=45,
ASMINB(6)=4.61000D-02,
ASMINB(8)=4.61000D-02,
ALCWIB =1.02000D+01,
ARCWIB =1.02000D+01,
ANFILE =2.73000D-02,
ANFIRB =2.73000D-02,
TSINB(5) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TSINB(7) =5.1315D+2, 5.1315D+2,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =4.2000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XRGN
RGNAMB='CO2 GAS LAYER',

LRGN=31, ILB=1, IUB=5, JLB=46, JUB=50,
TGINB =5.1315D+2,
PG4INB =3.8000D+6,
ILSOIB=7,
&END

&XEDT
DMPC=999999999, PRTC=999999999,
PFPC=999999999, BSFC=999999999,
TCDMP(1) =3.00D+01, 1.00D+20,
DTDMP(1) =3.00D+01, 5.00D+00,
TCPRT(1) =1.00D+20, 1.00D+20,
DTPRT(1) =1.00D+20, 1.00D+20,
LPRGN(1) =1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,
LPRGN(11) =1,1,1,1,1, 1,1,0,0,0,
LPRGN(61) =1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,
LPRGN(71) =1,1,1,1,1, 1,0,0,0,0,
LPRGN(91) =0,0,0,0,0, 1,1,1,0,0,
LPRGN(101) =0,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,
LPRGN(111) =1,1,1,1,1, 1,1,1,0,0,
LPRGN(191) =0,0,0,0,1, 1,0,0,0,0,
TCPFP(1) =1.00D+20,
DTPPP(1) =1.00D+20,
PPGRP(11) =0,0,0,1,1, 1,0,0,1,1,
PPGRP(21) =1,0,0,1,0, 0,0,0,1,1,
PPGRP(31) =0,0,1,0,0, 0,0,0,0,0,
TCBSF(1) =1.75D+1, 2.00D+01,
2.20D+01,
TCBSF(4) =2.50D+1, 1.00D+20,
DTBSF(1) =1.00D-1, 1.00D-02,
5.00D-03,
DTBSF(4) =1.00D-2, 5.00D-02,
SN(1)
='ALPLK1', 'ALPLK2', 'ALPLK3',
'ALPLK4', 'ALPLK5', 'ALPLK6', 'ALPGK',
'ALPSK1', 'ALPSK2', 'ALPSK3', 'ALPSK4',
'ALPSK5', 'ALPSK6', 'ALPSK7', 'ALPSK8',
'ALPSK9', 'ALPGE', 'ALPINK', 'ASMZ',
'RBSK1', 'RBSK2', 'RBSK3', 'RBSK4',
'RBSK5', 'RBSK6', 'RBSK7', 'RBSK8',
'RBSK9', 'RBSK10', 'RBSK11', 'RBSK12',
'RBLK8', 'RBLK9', 'RBIK1', 'RBIK2',
'RBLK1', 'RBLK2', 'RBLK3', 'RBLK4',

```

```

'RBLK5', 'RBLK6', 'RBLK7', 'RBGK5', &XIFA 5,
'RBGK1', 'RBGK2', 'RBGK3', 'RBGK4', MMIN =1.0D+04, EPS4=2.00000E-02, EPS5=5.00000E-01,
'PGMK1', 'PGMK2', 'PGMK3', 'PGMK4', MMAX =1.0D+07, EPS6=1.00000E+00,
'TLK1', 'TLK2', 'TLK4', 'TLK5', RLSBK(4)= 3.6D-3, EPS7=2.00000E+00, EPS8=1.00000E+06,
' , ALPHMT(4)= 5.0D-5, EPS9=5.00000E-01,
' , ALPHMT(5)= 5.0D-5, ALPBUB=0.8,
' , ALPDSP=0.9, EPS10=1.00000E-02, EPS17=8.51600E-0
' , ALPNT =0.9, 2, EPS18=1.00000E+02,
' , &END &END
' , 'TGK', 'TIPINK', 'PK' &XSTR
' , 'TSK1', 'TSK2', 'TSK3', 'TSK4' TAUST(2) = 1.0D-3, &NEDT
' , FMELT =0.800D+00, CMELT NEUPRI=1, IXSFTS=0, IXSPTT=0,
' , 'TSK5', 'TSK6', 'TSK7', 'TSK8' XCSTR =1.000D+00, WMELT IEDXST=0, INVPR=0, INVREG=0,
' , 'UK1', 'UK2', 'UK3', 'QN1' , XWSTR =1.000D+00, DWFAL IRHOMP=0,
' , 'VK1', 'VK2', 'VK3', 'QN2' , =2.000D-03, TWFAL IEDXST=2, INVPR=1, INVREG=0,
' , 'RLMBK1', 'RLMDK1', 'RLMBK2', 'RLMDK2' , BETACW=1.000D-01, =1.541D+03, TCRMIN=1.000D-05, ACRMIN=1.000D-05, NIOPT(4)=1000,
' , 'RLMBK4', 'RLMDK4', 'RLMBK4', 'RLMDK4' , FL9G5 =1.000D+00, TCRMIN=3.000D-04, FL9G5 =1.000D+00, NIOPT(100)=1,
' , 'RGBK', 'SAGBK', 'SABDK', 'IRGKM', ' , FL10G5=1.000D+00, FL10G5=1.000D+00, &END NIOPT(2)=0,
' , 'ALPNFK1', 'ALPNFK2', 'ALPNFK3', ' , TL10G5=1.000D-02, &END NIOPT(30)=0,1,
&END # For steady-state calculation &NFIK
&XEOS POW=3.60D+09, WDMAPA(1)=18*0.0, WDMAPR(1)=18*0.0,
ISAE(1,5)=0, IPOW=1, &END
IMRK(1,5)=0, AMPTAB(1)=1.0, 1.0, &NENV
ELIQU(1,5)= 2.16600D+02, TIMAMP(1)=0.0, 1.0D+10, ITLMOU=200, ITLMIN=50, IREB=500, NITO
TCRT(1,5) = 3.04100D+02, FRTP(1) = 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, VR=10,
ELIQD(1,5)=-8.07900D+04, DRAD(1)= 1.0000, 0.9033, 0.7280, EPSO=1.00000E-05, EPSFT=1.00000E-04
CVG(1,5) = 9.90680D+02, DAX(1) = 0.0000, 0.0000, 0.0000, EPSFAC=1.50000E+01,
RUGM(1,5) = 1.88920D+02, 0.0000, 0.0000, EPSMIN=1.00000E-05, FACREL=5.00000E
WM(1,5) = 4.40100D+01, 0.0000, 0.0000, 0.0000, +00,
&END 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, &END
&XTPP AKPS(1,1,1)= 4.54190D+00, 0.1234, 0.1437, 0.5658, EPSMIN=1.00000E-08, FACREL=5.00000E
6.35315D+02, 0.6694, 0.7687, +00,
1.02635D+04, 0.9967, 1.0000, 0.9226, 0.9706, &NSHL
-2.81578D-03, 0.7901, 0.6888, 0.9379, 0.8740, ISHLD=0, ISIGOD=2, ITEMOD=2, ITLMBG=5
8.80997D-07, 0.0851, 0.0000, 0.4419, 0.1127, , ITEMIP=1,
EPSM(1,5) = 1.95200D+02, 0.0000, 0.0000, 0.0000, EPSBKG=1.00000E-03,
SIGN(1,5) = 3.94100D+00, 0.0000, 0.0000, 0.0000, &END
NATOM(1,5) = 3, 0.0000, 0.0000, 0.0000, &NISO
&END AKPS(1,1,1)= 3.69720D+00, 0.0000, 0.0000, 0.0000, ISOTOP(1)='FERT', 'FISS', 'STEEL', 'C
5.17160D+02, 0.0000, 0.0000, 0.0000, OOL', 'CONT', 'FERT',
8.35470D+03, 0.0000, 0.0000, 0.0000, NCMIX(1,1)=1,2,3,4,5,
-2.29210D-03, 0.0000, 0.0000, 0.0000, THDENS(1)=2*9.80500E+03, 7.25600E+0
7.17150D-07, &END 3, 3.27020E+04, 2.52000E+03,
&XERG REGN = 1, &NPAR LNMN(1)=5*1,
REGC(1,1)=1,1,5,50, NREGB(1)=1,5,1,43, LMC(1,1)=1,
MATEOS(1,1)=1,1,1,1,1, NCRAD(1)=4*6,5, LMC(1,2)=2,
&END NCAXI(1)=4,3,2,5*1,2,2*4,2,31*1, LMC(1,3)=3,
&XMSC IGM=18, IGD=6, LMC(1,4)=4,
IVDL(5)=2, MT=5, LNISIP=5, NRXS=1, LMC(1,5)=5,
&END IXSREG(1,1)=1,29,1,57, AVDENS(1,1)=6.52403E+00,
&XMXF ALPSID=0.99, &END AVDENS(1,2)=6.48338E+00,
CORFZN(1,2) = 9.000D+1, NCRAD(1)=5*5, AVDENS(1,3)=7.73394E+00,
CORFZN(2,2) = 1.100D+2, NCAXI(1)=43*1, AVDENS(1,4)=1.34249E+02,
CORFZN(3,2) = 1.650D+2, IT=25, JT=43, ISNT=4, AVDENS(1,5)=1.43459E+01,
CORFZN(4,2) = 2.600D+2, IXSREG(1,1)=1,25,1,43, &END
CORFZN(5,2) = 2.030D+4, IDIVR=0, &NINI
&END CQS2=1.0D+02, &NQUS DECAY(1) = 1.30000E-02,
3.12000E-02, 1.34000E-01,
3.48000E-01, 1.41000E+00,
&XHMT LIPSTP=7, ITGAMM=5, IWTF=0, IQUASI=0, 3.82000E+00,
DTLMAX=1.0D+03, IFXUDL=0, BETAD(1)= 7.13478E-05,
TILFW =2.822D+03, DTSH=1.00000E-03, DTSMAX=5.00000E-0 1.03127E-03, 8.36637E-04,
TILFC =3.002D+03, 3, 1.79295E-03, 8.37992E-04,
CNP1 =4.000D+07, 1.44707E-04,
&END EPSG=1.00000E-05, EPSPHY=1.00000E-0 DSPECT(1, 1)= 0.00000E+00,

```



```

0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
DSPECT(1, 2)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
DSPECT(1, 3)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
DSPECT(1, 4)= 0.00000E+00,
6.68590E-03, 4.95520E-03,
1.26630E-02,
8.36640E-03, 1.47280E-02,
DSPECT(1, 5)= 5.31570E-03,
1.34939E-01, 6.80800E-02,
1.11298E-01,
6.85230E-02, 7.48210E-02,
DSPECT(1, 6)= 1.58609E-01,
4.57160E-01, 3.89470E-01,
3.71631E-01,
3.42475E-01, 4.22890E-01,
DSPECT(1, 7)= 4.16740E-01,
2.86778E-01, 3.34028E-01,
3.00795E-01,
3.01489E-01, 2.98223E-01,
DSPECT(1, 8)= 3.83051E-01,
1.12014E-01, 1.84462E-01,
1.74638E-01,
2.76471E-01, 1.83388E-01,
DSPECT(1, 9)= 3.62860E-02,
2.41990E-03, 1.90043E-02,
2.89642E-02,
2.68721E-03, 5.95510E-03,
DSPECT(1,10)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,11)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,12)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,13)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,14)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,15)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,16)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,17)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
DSPECT(1,18)= 0.00000E+00,
0.00000E+00, 0.00000E+00,
0.00000E+00,
POWER = 3.60000D+09, RHOIN
= 0.00000D+00,
GENTIN = 4.59000D-07, CM
= 0.00000D+00,
ETA1NP(1)= 6.34245D+04,
2.99138D+05, 1.01076D+05,
8.71991D+04,
3.44170D+03,
1.38253D+02,
BET1NP(1)= 7.79000D-05,
7.29000D-04, 6.48000D-04,
1.29000D-03,
6.05000D-04,
1.75000D-04,
&END

```

付録 C コレクションセット

- (1) インシュレータペレットの上下の構造物がなくなったとき、インシュレータペレットを破損させるコレクションセット

```

*ID TB360
*/
*/ SPECIAL CORRECTION SET TO BREAK THE CLADDING WITHOUT
*/ MECHANICAL SUPPORT.
*/
*I STRBRK.481
  IF ( FC .GE. ZERO ) THEN
*I STRBRK.488
  ELSE
  FC = ZERO
  RBLK3 = RBLK(IJ,3) + RBSK(IJ,7)*FC
  RBLK7 = RBLK(IJ,7) + RBSK(IJ,7)*(ONE-FC)
  SIELK(IJ,2) = ( RBLK(IJ,3)*SIELK(IJ,2)
& + RBSK(IJ,7)*FC*ELIQUUS(REGTAB(IJ,2),2))
& / RBLK3
  SIELK(IJ,5) = (RBLK(IJ,7)*SIELK(IJ,5) +
& RBSK(IJ,7)*(ONE-FC)*SIESK(IJ,4))/RBLK7
C
  ENDIF
*I PINHTR.556
  IF( NSEX(IJ-IBP2,2).EQ.0 .AND. NSEX(IJ+IBP2,2).EQ.0 )
& ICBRK(IJ)=1

```

- (2) 被覆管溶融移動の非同時性を考慮した場合、炉心部において液体スチールと構造材とのドラッグを大きくさせたコレクションセット

```

*ID YNCQS
*/
*/ MULTIPLIER FOR LIQUID-VELOCITY FIELD 2 ONLY IN ACTIVE CORE.
*/
*/ *** COMMON/KQQC ***
*I SZ3V0.1
  * ,CQS2
*/
*/ *** RDINP ***
*I SG4U7.3
  * ,CQS2
*/
*/ *** MXF ***
*I MXF.1753
  IF(MXFOPT(90).EQ.1) THEN
  IF(N.GE.128 .AND. N.LE.230) THEN
  AQSLK(N,2) = CVMGT( QQLGE
& , AQSLK(N,2)*MIN( TEN, ONE/Z(RBLAK1(N,2)) )
& , COND1 ) * CQS2
  ENDIF
  ENDIF
*I MXF.1762
  IF(MXFOPT(90).EQ.1) THEN
  IF(N.GE.128 .AND. N.LE.230) THEN
  BQSLK(N,2) = CVMGT( ZERO
& , BQSLK(N,2)*MIN( TEN, ONE/Z(RBLAK1(N,2)) )
& , COND1 ) * CQS2
  ENDIF
  ENDIF
*I MXF.1825
  IF(MXFOPT(90).EQ.1) THEN
  IF(N.GE.128 .AND. N.LE.230) THEN
  AQSTK(N,2) = CVMGT( QQLGE
& , AQSTK(N,2)*MIN( TEN, ONE/Z(RBTHK1(N,2)) )
& , COND1 ) * CQS2
  ENDIF
  ENDIF
*I MXF.1834
  IF(MXFOPT(90).EQ.1) THEN
  IF(N.GE.128 .AND. N.LE.230) THEN
  BQSTK(N,2) = CVMGT( ZERO
& , BQSTK(N,2)*MIN( TEN, ONE/Z(RBTHK1(N,2)) )
& , COND1 ) * CQS2
  ENDIF
  ENDIF

```

付録 D 定常計算による流量配分の調整

ULOF 事象の過渡計算を行う前に 30 秒間の定常計算を実施し、過渡計算に必要な初期及び境界条件を以下のように得た。

まず、SIMMER-III の核計算モデルを用いて各メッシュセルにおけるスミア密度及び比出力を得ると、それらから出力密度が求まる。炉心部における出力密度分布を表 D-1 に示す。表 D-1 における炉心中心部の出力密度を使って、軸方向及び径方向に出力密度を規格化する (表 D-2)。SIMMER-III では、軸方向及び径方向の分布により炉心全体の出力密度を計算するので、表 D-2 の太字部分を入力として与えた。

得られた出力密度分布を用いて、SIMMER-III の流体力学計算部により、炉心圧力が 42bar 程度で総質量流量が 11889kg/s となるように上下部境界における圧力を決めた。また、表 D-3 で示された典型的な高速炉の平衡末期炉心における出力流量比 (P/F) となるようにエントランスノズル部におけるオリフィス係数により流量配分を調整した。以上の定常計算で決められた出入口境界における圧力及びオリフィス係数は表 D-4 に示すとおりである。また、質量流量の履歴を図 D-1 に示す。30 秒で十分に定常状態に達していることが分かる。

これらの計算で得られた各メッシュセルにおける物理量をリスタートファイル/入力ファイル変換プログラムを使って、過渡計算の初期値として与えた。

表 D-1 SIMMER-III の核計算モデルから求めた出力密度分布

Axial mesh No.	1 st ring	2 nd ring	3 rd ring	4 th ring	5 th ring
34	2.16788E+07	1.95777E+07	1.57191E+07	9.91711E+06	3.22698E+06
33	2.87021E+07	2.59246E+07	2.08672E+07	1.34005E+07	4.18481E+06
32	1.12556E+08	1.01673E+08	8.16245E+07	6.23550E+07	5.64073E+06
31	1.45762E+08	1.31687E+08	1.05927E+08	8.14409E+07	7.52541E+06
30	1.75441E+08	1.58516E+08	1.27649E+08	9.84616E+07	9.21296E+06
29	2.01258E+08	1.81850E+08	1.46532E+08	1.13267E+08	1.06319E+07
28	2.22620E+08	2.01153E+08	1.62142E+08	1.25494E+08	1.17933E+07
27	2.38896E+08	2.15850E+08	1.74015E+08	1.34769E+08	1.26741E+07
26	2.49690E+08	2.25580E+08	1.81852E+08	1.40873E+08	1.32516E+07
25	2.54720E+08	2.30089E+08	1.85441E+08	1.43642E+08	1.35113E+07
24	2.53889E+08	2.29287E+08	1.84713E+08	1.43016E+08	1.34511E+07
23	2.47231E+08	2.23208E+08	1.79688E+08	1.39013E+08	1.30694E+07
22	2.35003E+08	2.12083E+08	1.70553E+08	1.31772E+08	1.23776E+07
21	2.17582E+08	1.96254E+08	1.57590E+08	1.21489E+08	1.13990E+07
20	1.95797E+08	1.76474E+08	1.41389E+08	1.08623E+08	1.01637E+07
19	1.70513E+08	1.53521E+08	1.22556E+08	9.36592E+07	8.65808E+06
18	1.44124E+08	1.29515E+08	1.02696E+08	7.76711E+07	7.03236E+06
17	3.65992E+07	3.28380E+07	2.60024E+07	1.64803E+07	5.89374E+06
16	3.14305E+07	2.81308E+07	2.20769E+07	1.36655E+07	5.36041E+06

N.B.) Unit: W/m³

表 D-2 規格化された出力密度分布

Axial mesh No.	1 st ring	2 nd ring	3 rd ring	4 th ring	5 th ring
34	8.51087E-02	7.68598E-02	6.17114E-02	3.89336E-02	1.26688E-02
33	1.12681E-01	1.01777E-01	8.19225E-02	5.26091E-02	1.64291E-02
32	4.41884E-01	3.99156E-01	3.20449E-01	2.44799E-01	2.21449E-02
31	5.72246E-01	5.16991E-01	4.15857E-01	3.19728E-01	2.95440E-02
30	6.88764E-01	6.22316E-01	5.01136E-01	3.86550E-01	3.61691E-02
29	7.90117E-01	7.13923E-01	5.75268E-01	4.44673E-01	4.17399E-02
28	8.73982E-01	7.89705E-01	6.36552E-01	4.92677E-01	4.62991E-02
27	9.37882E-01	8.47403E-01	6.83166E-01	5.29090E-01	4.97570E-02
26	9.80258E-01	8.85602E-01	7.13933E-01	5.53051E-01	5.20245E-02
25	1.00000E+00	9.03304E-01	7.28023E-01	5.63924E-01	5.30441E-02
24	9.96742E-01	9.00157E-01	7.25164E-01	5.61464E-01	5.28075E-02
23	9.70605E-01	8.76290E-01	7.05436E-01	5.45749E-01	5.13091E-02
22	9.22596E-01	8.32614E-01	6.69573E-01	5.17323E-01	4.85931E-02
21	8.54203E-01	7.70474E-01	6.18682E-01	4.76952E-01	4.47511E-02
20	7.68680E-01	6.92819E-01	5.55080E-01	4.26441E-01	3.99015E-02
19	6.69415E-01	6.02707E-01	4.81141E-01	3.67696E-01	3.39907E-02
18	5.65815E-01	5.08463E-01	4.03174E-01	3.04928E-01	2.76083E-02
17	1.43684E-01	1.28919E-01	1.02083E-01	6.46999E-02	2.31382E-02
16	1.23393E-01	1.10439E-01	8.66717E-02	5.36493E-02	2.10444E-02

表 D-3 参考にした P/F 分布とガス炉の設定

(a) P/F for typical fast reactor.

No.	No. of S/A	P/F
1	1	1.15
2	12	1.13
3	12	1.12
4	24	1.09
5	30	1.08
6	12	1.06
7	6	1.04
8	18	1.03
9	18	1.02
10	12	1.01
11	24	0.99
12	24	0.98
13	24	0.97
14	24	0.95
15	6	0.94
16	12	0.93
17	12	0.92
18	6	0.91
19	12	0.89
20	12	0.81
21	6	0.74
Total	295	

(b) P/F used in the present analysis.

Ring No.	No. of S/A	(P/F) × (No. of S/A)	P/F
1st	37 × 295/550 =19	1.15 × 1	1.13
		1.13 × 12	
		1.12 × 6	
2nd	117 × 295/550 =63	1.12 × 6	1.09
		1.09 × 24	
		1.08 × 30	
		1.06 × 3	
3rd	180 × 295/550 =97	1.06 × 9	1.01
		1.04 × 6	
		1.03 × 18	
		1.02 × 18	
		1.01 × 12	
4th	216 × 295/550 =116	0.98 × 2	0.92
		0.97 × 24	
		0.95 × 24	
		0.94 × 6	
		0.93 × 12	
		0.92 × 12	
		0.91 × 6	
		0.89 × 12	
0.81 × 12			
		0.74 × 6	

N.B.) Total number of S/A for gas reactor: 550

表 D-4 定常計算による流量配分の調整

Ring No.	No. of S/A	Orifice coefficient	Normalized power density	Mass flow rate (kg/s)	P/F	Pressure at inlet	Pressure at exit
1	37	90	1.000	9.679E+02	1.127	57 bar	38 bar
2	117	110	0.903	2.873E+03	1.084		
3	180	165	0.728	3.837E+03	1.004		
4	216	260	0.564	3.818E+03	0.908		
5	186	20300	0.053	4.083E+02	0.730		

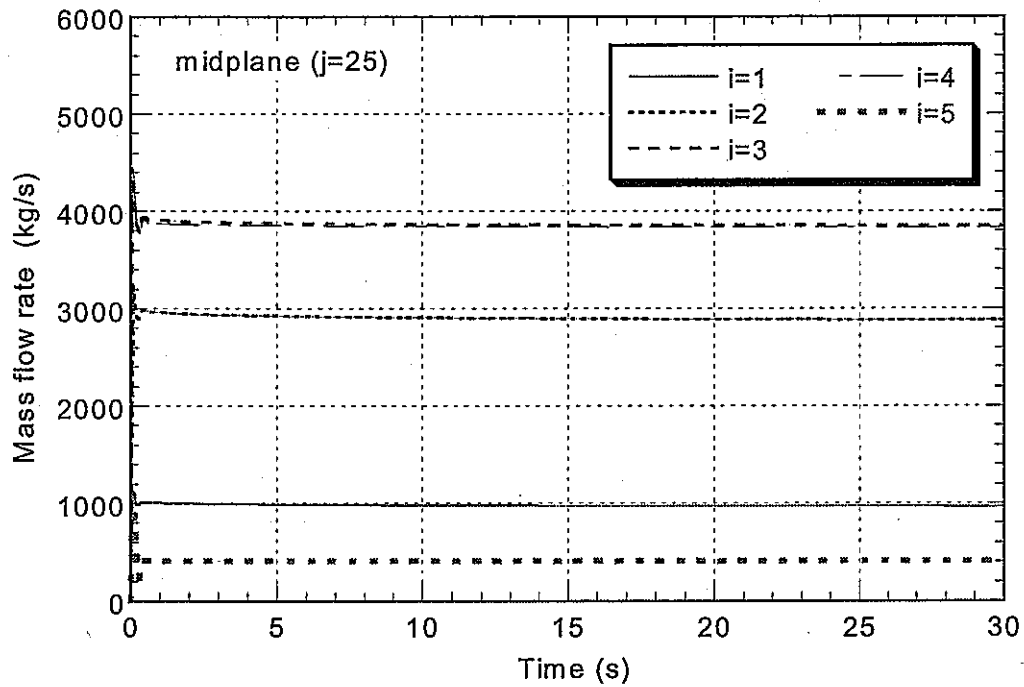


図 D-1 定常計算における質量流量の履歴

付録 E 被覆管溶融移動の非同時性を考慮したときの反応度挿入率

実際の炉心では、各燃料集合体における出力、流量、燃焼度などの特性の相違があるため、被覆管及び燃料は同時に溶融破損することはない。この非同時性によって、P/F 値の高い集合体は先行的に被覆管溶融を生じ、反応度挿入に寄与することになる。ここでは、P/F 分布を考慮して被覆管溶融移動の非同時性を考慮したときの反応度挿入率を求める。

(1) 被覆管溶融移動開始時間

全炉心解析で得られた各リングの midplane における被覆管の温度履歴を図 E-1 に示す。各リングの温度上昇を線形近似してみると、それぞれ図中の式で表される。これらの係数を P/F 値に対してプロットしたものが図 E-2 である。各係数は簡単に P/F 値の関数とすると、被覆管温度上昇率は図中の 2 次式で表される。図 E-1 で示された被覆管初期温度を簡単にするため平均化すると 1030K となり、燃料を溶かすまでに 723K 上昇しなくてはならない。したがって、典型的な高速炉の平衡末期炉心における P/F 値を用いて、各 P/F 値に対する被覆管温度上昇率で 723K を除することによって被覆管溶融移動開始時間を見積もることができる。

(2) 1 集合体当りの反応度変化率

全炉心解析の結果より、被覆管溶融部は midplane 付近より下記のように拡大していた。

溶融範囲	時間
① 10cm	t=17.6s
② 30cm	t=18.0s
③ 50cm	t=18.6s
④ 60cm	t=19.4s
⑤ 150cm (炉心全部)	

これを用いて SIMMER-III で静的核計算を行った結果を表 E-1 に示す。健全状態の実効増倍率 1.0325、遅発中性子割合 0.00387 を用いた。ちなみに、炉心部の被覆管が全てなくなった場合の反応度は 8.26 β も挿入されると見積もられた。表中の右側には各リングの 1 集合体当りの反応度変化率が示されており、これをプロットしたものが図 E-3 である。これを簡単に線形近似することによって、1~4 リングの各 P/F 値に対する 1 集合体当りの反応度変化率は、それぞれ 0.008067, 0.006467, 0.004267, 0.001200 β /s/SA となる。これらを内挿することによって P/F 毎の 1 集合体当りの反応度変化率を得ることができる。

(3) 反応度履歴

上記の被覆管溶融移動開始時間と 1 集合体当りの反応度変化率を積算すると、表 E-2 のように反応度履歴を求められる。ただし、表 E-1 に示すように、集合体には P/F 値に応じた被覆管溶融移動による最大の反応度があるので、反応度上昇の制限をした。表中の右側の反応度履歴をプロットしたものが図 E-4 に示してある。これは定格出力からの反応度上昇なので、「1P₀」と表しており、1 β 近傍の反応度挿入率は 0.6 β /s であった。図中には SIMMER-III の解析結果も示している。非同時性を考慮した場合は SIMMER-III の反応度挿入率 5.8 β /s の 1/10 程度となり、被覆管溶融移動の非同時性の

影響は大きいと言える。また、0.6\$/s で反応度挿入したときにドップラーによる負の反応度効果によって1\$に到達せずに徐々に事象が進展することを想定した場合、 $2P_0$ 、 $3P_0$ の出力となることも考えられる。そのときの反応度履歴は、簡単に被覆管温度上昇率及び1集合体当りの反応度変化率のみが大きくなると仮定して算出されることになるが、 $3P_0$ を考慮しても1.8\$/s の反応度挿入率となり、非同時性の影響は無視できない。

表 E-1 静的核計算による1集合体当りの反応度

No.	Time (s)	keff	$\Delta k/k'$	Reactivity (\$)	Reactivity per SA (\$/SA)
1 st ring ①	17.6	1.03303082	0.000478387	0.12370	0.00334
1 st ring ②	18.0	1.03407779	0.001458481	0.37714	0.01019
1 st ring ③	18.6	1.03507052	0.002385969	0.61698	0.01668
1 st ring ④	19.4	1.03525274	0.00255602	0.66095	0.01786
1 st ring ⑤	-	1.03786674	0.004988882	1.29005	0.03487
2 nd ring ①	17.6	1.03384756	0.001243128	0.32146	0.00275
2 nd ring ②	18.0	1.03654434	0.003759652	0.97219	0.00831
2 nd ring ③	18.6	1.03904982	0.006085957	1.57374	0.01345
2 nd ring ④	19.4	1.03950953	0.006511574	1.68380	0.01439
2 nd ring ⑤	-	1.04586493	0.012357305	3.19542	0.02731
3 rd ring ①	17.6	1.03387803	0.001271634	0.32883	0.00183
3 rd ring ②	18.0	1.03662702	0.003836599	0.99209	0.00551
3 rd ring ③	18.6	1.03917024	0.006197483	1.60258	0.00890
3 rd ring ④	19.4	1.0396251	0.006618514	1.71145	0.00951
3 rd ring ⑤	-	1.04588691	0.012377399	3.20062	0.01778
4 th ring ①	17.6	1.03297839	0.000429254	0.11100	0.00051
4 th ring ②	18.0	1.03391842	0.001309419	0.33860	0.00157
4 th ring ③	18.6	1.03480383	0.00213698	0.55259	0.00256
4 th ring ④	19.4	1.03490046	0.002227211	0.57592	0.00267
4 th ring ⑤	-	1.03670716	0.00391117	1.01137	0.00468
Core	-	1.06773916	0.031945391	8.26062	0.03824

表 E-2 非同時性を考慮した反応度履歴

P/F	No of SA	C _{Totad}	t(s)	S _{max}	S/s/SA	S/s	P/F=													history (\$)						
							1.15	1.13	1.12	1.09	1.08	1.06	1.04	1.03	1.02	1.01	0.99	0.98	0.97							
1.15	1	57.490	12.576	0.037	0.009	0.009																			0.000	
1.13	12	54.332	13.307	0.410	0.008	0.097	0.007																			0.007
1.12	12	52.802	13.693	0.394	0.008	0.092	0.010	0.037																		0.047
1.09	24	48.408	14.935	0.686	0.007	0.156	0.021	0.158	0.115																	0.294
1.08	30	47.010	15.380	0.816	0.006	0.186	0.025	0.201	0.156	0.069																0.452
1.06	12	44.310	16.317	0.293	0.006	0.068	0.033	0.293	0.242	0.215	0.174															0.958
1.04	6	41.742	17.321	0.130	0.005	0.031	0.037	0.390	0.335	0.372	0.361	0.068														1.563
1.03	18	40.508	17.849	0.364	0.005	0.087	0.037	0.410	0.384	0.454	0.459	0.104	0.016													1.865
1.02	18	39.306	18.394	0.338	0.005	0.082	0.037	0.410	0.394	0.540	0.561	0.141	0.033	0.047												2.162
1.01	12	38.136	18.958	0.209	0.004	0.051	0.037	0.410	0.394	0.628	0.666	0.179	0.050	0.096	0.046											2.506
0.99	24	35.896	20.141	0.350	0.004	0.088	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.259	0.086	0.199	0.143	0.061										3.092
0.98	24	34.826	20.761	0.317	0.003	0.080	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.293	0.105	0.253	0.194	0.092	0.054									3.335
0.97	24	33.788	21.398	0.283	0.003	0.071	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.293	0.125	0.308	0.246	0.125	0.110	0.051								3.602
0.95	24	31.810	22.729	0.216	0.002	0.055	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.293	0.130	0.364	0.338	0.193	0.227	0.157	0.095							4.140
0.94	6	30.870	23.420	0.046	0.002	0.012	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.293	0.130	0.364	0.338	0.209	0.288	0.212	0.144							
0.93	12	29.964	24.129	0.074	0.002	0.019	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.293	0.130	0.364	0.338	0.209	0.350	0.268	0.195							
0.91	6	28.248	25.594	0.020	0.001	0.006	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.293	0.130	0.364	0.338	0.209	0.350	0.317	0.283							
0.89	12	26.664	27.115	0.007	0.000	0.003	0.037	0.410	0.394	0.686	0.816	0.293	0.130	0.364	0.338	0.209	0.350	0.317	0.283							
0.81	12																									
0.74	6																									

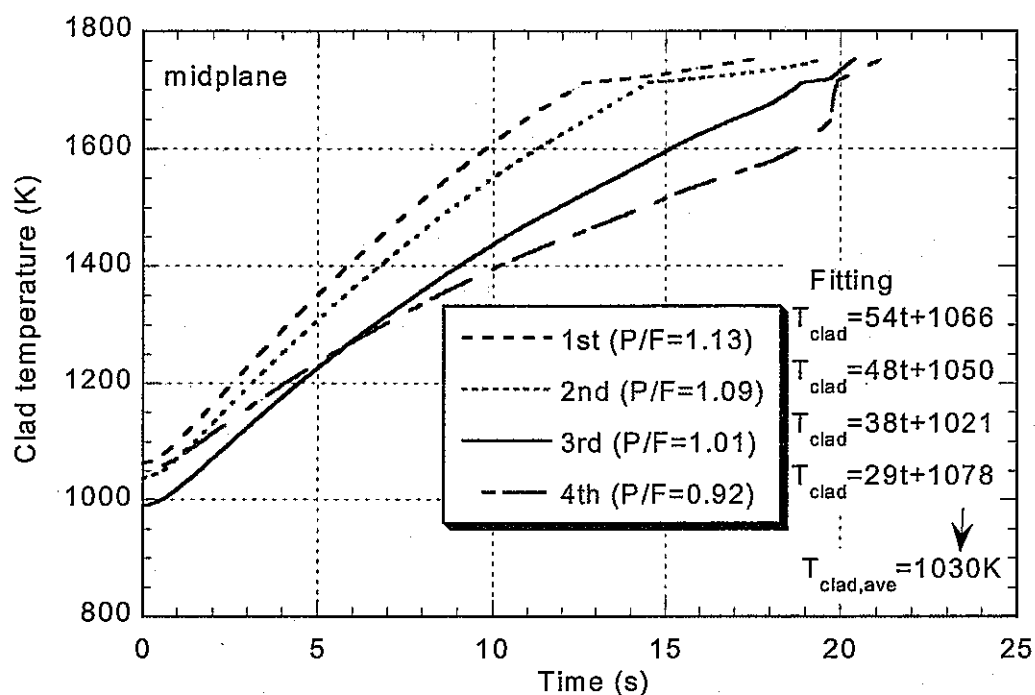


図 E-1 midplane 付近における被覆管の温度履歴

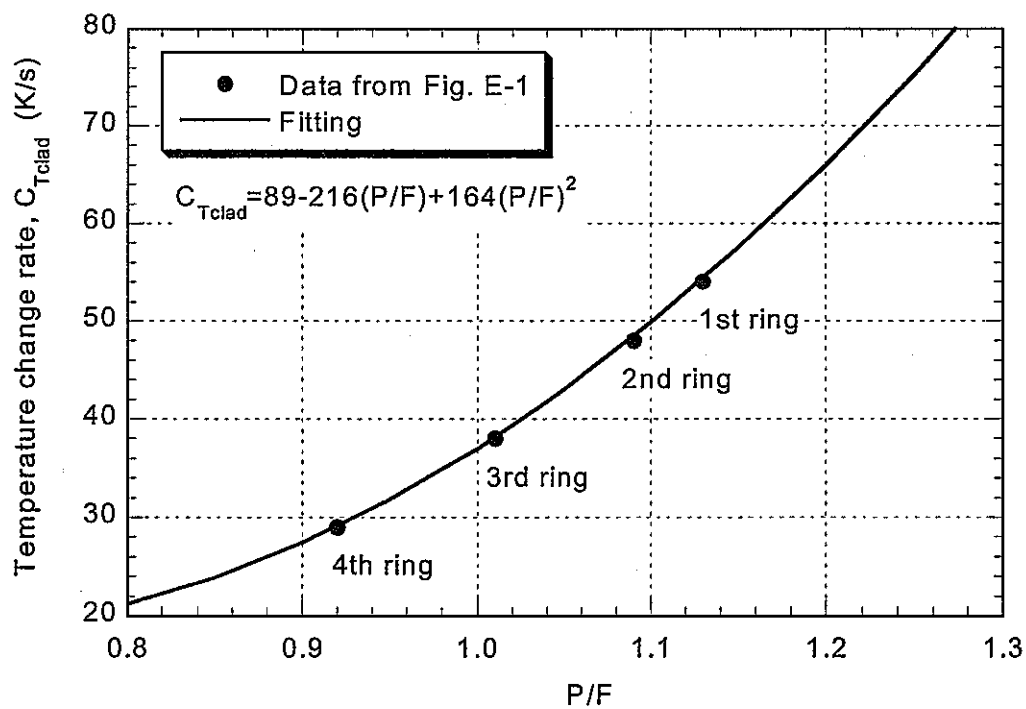


図 E-2 被覆管の温度上昇率

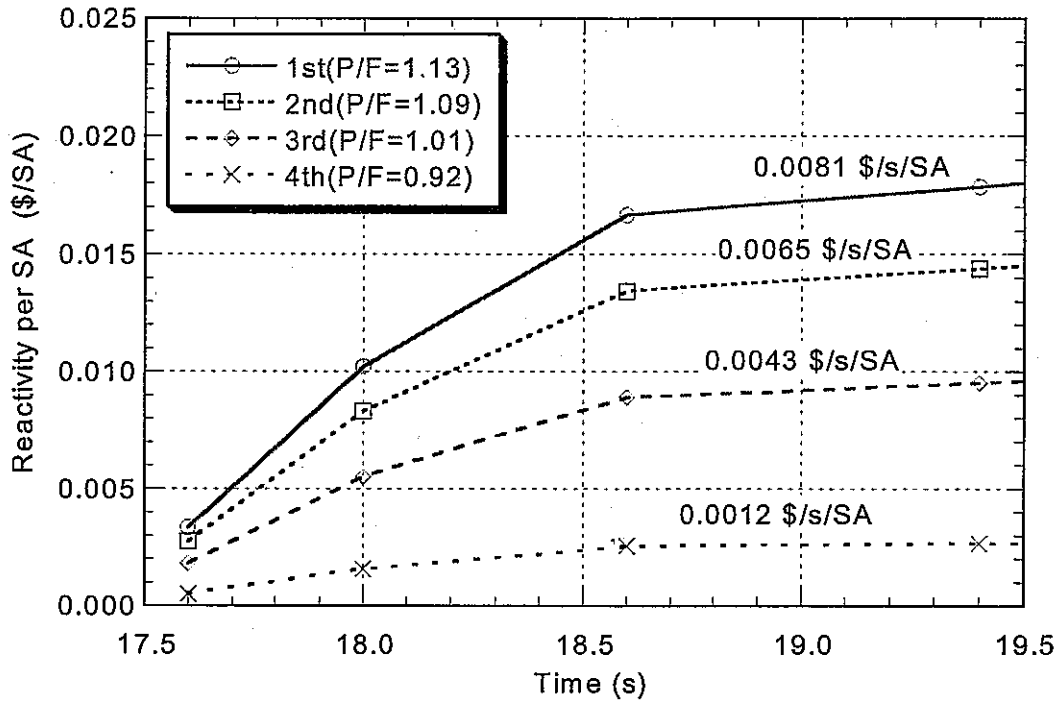


図 E-3.1 集合体当りの反応度変化率

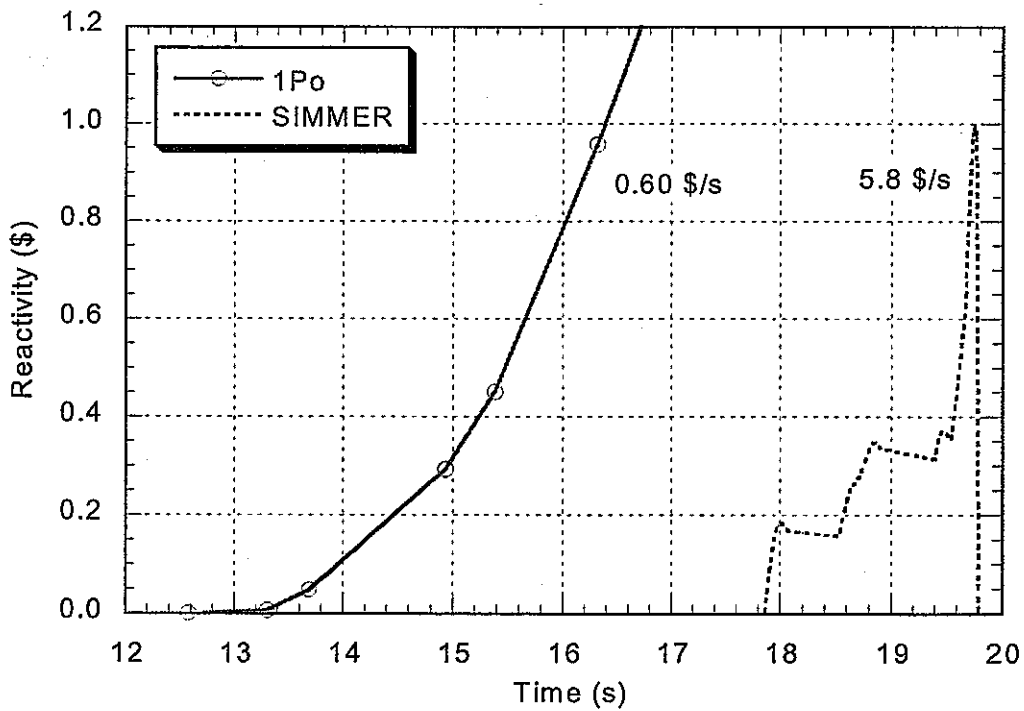


図 E-4 被覆管溶融移動の非同時性を考慮した反応度履歴