

ABLE 炉心の再臨界回避の有効性検討 (技術報告)

2002年11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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2002

ABLE 炉心の再臨界回避の有効性検討 (技術報告)

藤田 朋子[†]、飛田 吉春^{††}

要旨

高速炉は炉心が最大臨界体系にないために、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て、再臨界に至る可能性がある。格納系に影響を与えるような厳しい再臨界の発生は、従来の炉心崩壊事故解析等の知見から、炉心に大規模な溶融燃料プールが形成された場合に限られることが示されている。

厳しい再臨界の可能性を排除するための方策として、上下軸ブランケット燃料を一部削除した ABLE (Axial BLanket Eliminated) 集合体が提案されている。本検討では、再臨界回避方策としての有効性を確認するために、溶融燃料の炉心外への排出促進効果を SIMMER-III コードにて評価し、以下の結論を得た。

ABLE 集合体は、炉心からの燃料排出を促進し、遷移過程初期の厳しい再臨界を回避出来る可能性がある。ABLE 炉心の再臨界回避の可否は、燃料エンタルピーレベルへの依存性が大きく、ソリダス点を越えて高エンタルピーであるほど、その有効性は向上する。しかしながら、燃料のエンタルピーレベルが低い状態で推移する低エンタルピーシナリオにおける再臨界回避については、さらなる検討が必要であることが明らかとなった。

† 大洗工学センター 要素技術開発部 リスク評価研究グループ (現 (株) 東芝)

†† 大洗工学センター 要素技術開発部 リスク評価研究グループ

The investigation on the prevention of recriticality in ABLE core

Tomoko FUJITA*¹, Yoshiharu TOBITA*²

Abstract

A massive motion of molten fuel and increase of reactivity during a HCDA (Hypothetical Core Disruptive Accident) in a fast reactor may result in a recriticality, since the core configuration of a fast reactor does not produce the maximum reactivity. The analyses of HCDA performed in the past have shown that the severe recriticality, which affected the integrity of a containment, could occur only if a whole-core molten pool was formed in the disrupted core.

ABLE (Axial BLanket Eliminated) subassemblies, in which a part of the axial blanket pellet is eliminated, have been proposed as a measure to prevent the occurrence of such a severe recriticality. This study investigates the enhancement of molten fuel discharge from a reactor core using SIMMER-III code in order to assess the ability to prevent the severe recriticality.

It is concluded that ABLE subassemblies enhance the fuel discharge from a reactor core and have an capability to prevent the severe recriticality in the early stage of the transition phase. The capability depends on the fuel enthalpy level in the core region, and rises as the enthalpy becomes higher than the solidus enthalpy. However, it is also shown that the prevention of recriticality in a low enthalpy scenario, in which the average enthalpy level of the fuel in the core is less than solidus energy, needs further investigation.

*1 Toshiba co. Ltd.

*2 Nuclear System Safety Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC.

目次

要旨	i
目次	iii
図表目次	v
1. 緒言	1
2. 再臨界回避の着目点	2
2.1. CMR 概念について	2
2.2. 再臨界回避方策	2
3. 評価における判断条件と解析条件	4
3.1. 判断条件と評価手順	4
3.1.1. 判断条件	4
3.1.2. 評価手順	4
3.2. 評価炉心	4
3.3. 解析条件	5
4. 集合体評価	7
4.1. 目的	7
4.2. 解析条件	7
4.3. 燃料流出マップの作成と燃料流出メカニズムの解明	8
4.4. 再臨界回避方策の最適化検討	10
4.5. まとめ	12
5. 全炉心評価	13
5.1. 目的	13
5.2. 再臨界回避達成目標と判断条件	13
5.3. 解析条件	13
5.4. ABLE 有効性を支配する因子	15

5.5. 遷移過程シナリオ.....	15
5.5.1. ABLE 炉心.....	15
5.5.2. UAB 付き ABLE 炉心.....	21
5.5.3. 通常炉心の場合.....	22
5.5.4. 静的核計算.....	23
5.6. 考察.....	24
5.6.1. 集合体評価との整合性.....	24
5.6.2. 炉心の ABLE 化による燃料流出量の予測.....	24
5.7. まとめ.....	25
6. 結論.....	27
謝辞.....	28
参考文献.....	29

図表目次

図 1	CMR による再臨界回避.....	31
図 2	再臨界回避方策.....	31
図 3	炉心集合体配置図.....	32
図 4	径方向非均質炉心の P/F 値分布.....	33
図 5	解析体系図.....	34
図 6	SAS4A チャンネル配置図.....	35
図 7	SAS4A 解析結果による出力履歴.....	36
図 8	各集合体の燃料流出挙動.....	37
図 9	燃料流出マップ.....	38
図 10	炉心燃料領域に残留する燃料量の推移.....	39
図 11	再臨界回避方策の改良案.....	40
図 12	再臨界回避方策の評価結果.....	41
図 13	起因過程の反応度・出力履歴.....	42
図 14	引継時の炉心状態.....	42
図 15	SIMMER-III 解析体系図.....	43
図 16	ABLE 炉心シナリオのまとめ.....	44
図 17	高エンタルピーシナリオのまとめ.....	46
図 18	低エンタルピーシナリオのまとめ.....	47
図 19	投入エネルギーと残留燃料割合の相関マップ.....	48
図 20	FAIDUS 炉心との比較.....	48
図 21	低エンタルピー燃料の流出メカニズムの調査.....	49
図 22	燃料の初期侵入抑制の効果.....	50
図 23	ABLE ピン束本数低減の効果.....	51
図 24	燃料の同時落下によるコンパクション効果.....	52
図 25	内部ブランケット燃料の崩壊の影響.....	52
図 26	UAB 付き ABLE 炉心シナリオのまとめ.....	53
図 27	通常炉心シナリオのまとめ.....	55
図 28	実証炉評価との比較.....	57
図 29	集合体評価との整合性.....	58
図 30	心の ABLE 化による燃料流出量の予測.....	58
表 1	評価対象炉心の緒元.....	30
表 2	ABLE 炉心の静的反応度変化解析結果.....	30

1. 緒言

実用化戦略調査研究の一環として、有力な候補プラントであるナトリウム冷却 MOX 燃料大型高速炉炉心の炉心損傷事故評価を実施した。

同炉心における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、高速炉が最大臨界体系にないため、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て、即発臨界に至る可能性がある。従って、炉心損傷事故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[1]。

原型炉の遷移過程評価[2]などの従来からの知見から、炉停止に失敗して、冷却材流量低下型事象（ULOF: Unprotected Loss Of Flow）が発生し、大規模な溶融燃料プールが形成された場合に限り、径方向揺動（スロッシング）等によって燃料が移動あるいは集中し、正反応度が印加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。

径方向プール形成時のプール運動による有意な出力上昇や即発臨界を回避するために、ABLE 集合体（Axial Blanket Eliminated: 軸ブランケット削除型集合体）が、提案されている。これは、集合体内の一部の燃料ピンについて、上部軸ブランケット（UAB: Upper Axial Blanket）と下部軸ブランケット（LAB: Lower Axial Blanket）上下軸ブランケットを削除し、破損燃料を炉心領域外あるいは集合体外への排出促進させることを意図して設計されたものである。

本研究は、ABLE 集合体が再臨界回避方策としての有効性について、集合体規模及び全炉心規模の炉心損傷事故評価を行うことにより、確認することを目的とする。また、燃料排出促進効果の確認における比較対象として、通常集合体及び LAB のみ一部削除型集合体(UAB 付き ABLE 集合体と呼ぶ)についても評価する。

2. 再臨界回避の着目点

2.1. CMR 概念について

従来の評価研究から、ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心では、遷移過程において、径方向の燃料集中によって、即発臨界に至ることが報告されている[2]。このような燃料の径方向集中を防止することで、再臨界を回避しようとする概念が CMR(Controlled Material Relocation)である[3]。CMR 概念は、燃料やスチール、中性子吸収体などの反応度の増減に密接に関わる材料の振る舞いを制御してやることにより、即発臨界の超過を防止しようとするものである。燃料の径方向運動が開始する前に、もっとも反応度効果の大きい燃料を、軸方向へ排出する方策をとる場合、図 1 のように事象は緩和されると考えられる。このような CMR 概念に基づき、次節のような再臨界回避方策が提案されている。

2.2. 再臨界回避方策

燃料の径方向運動の開始前に、軸方向へ燃料を排出させることに着目し、下記のような方策が提案されている。

- a. ABLE 型
- b. 内部ダクト型

ABLE 型は、図 2 (1) に示すように、燃料集合体の中心部に配置される約 1 割の燃料ピンに対し、上下軸ブランケット燃料あるいは、下部軸ブランケット燃料のみを削除した概念である。熱容量の大きいブランケット燃料を削除することにより、熔融燃料の温度を低下させることなく、炉心領域から排出させることが可能である。また、ブランケット燃料をガスプレナムに置換することにより、被覆管内にも燃料が入り込み、被覆管を熔融破損するため、流路が拡大し、燃料の流出を促進する。

一方、内部ダクト型は、図 2 (2) に示すように、燃料集合体の中心部に配置される約 1 割の燃料ピンを内対面間距離 6 cm の流路で置換された概念である。定格運転時は、内部ダクト内流路には微少の冷却材流量が確保されているが、流量低下型事象などにより燃料が破損すると、構造材肉厚の比較的薄い内部ダクト壁を破って、炉心入口プレナムへ炉心燃料は流出する。これにより、厳しい再臨界の発生を防止する。

一般に、内部ダクト型と比較して、ABLE 型は、燃料装荷量は一部の軸ブランケット燃料を差し引くだけであるため、炉心性能へ与えるインパクトが少ない。平成 12 年度設計炉心では、ABLE 型を採用しており、本研究では、特に ABLE 型に着目して、再臨界回避に対する有効性を検討した。このような再臨界回避方策の有効性の評価は、集合体規模にてその燃料流出促進効果を確認している[4]が、本報告では、その知見を踏ま

えた上で、CABRI-FAST EFM1 試験による実験的知見[5]を取り入れ、より現実に近い燃料流出挙動を模擬し、集合体評価及び全炉心評価を実施した。内部ダクト型については、FAIDUS 炉心に関する既往評価研究[6] - [8]を参考にし、ABLE 炉心の場合と比較した。

3. 評価における判断条件と解析条件

3.1. 判断条件と評価手順

本研究の目的は、炉心損傷事故時において、ABLE 集合体が再臨界回避方策としての有効であるかを確認することである。

3.1.1. 判断条件

再臨界回避を達成するためには、(1) 限界プール形成以前に、(2) 有意な燃料量を、(3) あらかじめ設定された燃料排出経路から、炉心外へ排出することが求められる。限界プールとは、自励的スロッシングによって即発臨界を超過し、厳しいエナジェティクスに至る可能性のある燃料プールを指す。既往評価研究から、上記の再臨界回避の達成判断条件を、定量的に表すと、(1) 実効プール断面積が 30%未満のうちに、(2) 全炉心燃料量の 30%以上を、(3) ABLE 集合体の軸ブランケット燃料削除部分から炉心外へ排出すること、となる。このような判断条件を念頭に置き、集合体規模及び全炉心規模の炉心損傷事故評価を行う。

3.1.2. 評価手順

集合体規模の評価では、上記の判断条件のうち、(2)及び(3)に関連する燃料排出促進効果に着目する。燃料流出挙動の出力依存性を評価し、燃料流出マップを作成する。これを参照することにより、全炉心の場合を予測する。燃料排出促進効果の確認における比較対象として、通常集合体及び LAB のみ一部削除型集合体(UAB 付き ABLE 集合体と呼ぶ)についても評価する。

また、全炉心規模の評価では、上記の判断条件のうち、(1)~(3)の全てに着目し、ABLE 炉心の有効性や有効に機能する条件等を明らかにする。全炉心評価では、SAS4A コードによる起因過程解析結果を引継いで、SIMMER-III を用いた核計算を考慮した評価を行う。集合体評価と全炉心評価の整合性についても検討を行う。

3.2. 評価炉心

本研究の目的は、炉心損傷事故時において、ABLE 集合体が再臨界回避方策としての有効であるかを確認することである。平成 12 年度径非均質炉心を評価対象とする。同炉心の諸元と炉心集合体配置図を表 1 及び図 3 に示す。集合体に内蔵される燃料ピンのうち、集合体中央の約 1 割のピンは、ABLE 型を採用していること、内部ブランケット燃料集合体を炉心にリング状に配置し、これによって、最大炉心ボイド反応度の低下や増殖比の向上を図っていることが、大きな特徴である。図 4 は、燃料集合体の P/F 値の

分布を示す。実証炉や、もんじゅなどの高速炉炉心と比較して、同炉心の P/F 値は非常に広く分布していることが特徴である。全炉心評価では、平衡末期炉心の原子数密度データを用い詳細な核計算結果を反映して、実施している。SIMMER-III の設定には、TWOTRAN を使用した。

3.3. 解析条件

炉心損傷事故に至る代表的な事象として、発生確率と影響の両面で支配的と考えられる冷却材流量低下型スクラム失敗事故を評価する。また、解析モデルは、CABRI-FAST EFM1 試験について燃料分散・固化挙動に関わる解析モデルや条件を調整した [9]SIMMER-III コードを使用する。

● 解析モデル

- ◆ 速度場の割り当ては、下記のように設定する

速度場 q 1 : 液相燃料、液相スチール、ナトリウム

速度場 q 2 : 燃料粒子、スチール粒子、制御材

速度場 q 3 : ガス

- ◆ 運動量交換関数の算出モデルは、下記モデルを採用する。

	オリジナル	PARVIS	ERGUN	PACKING	CHUNK
流体-流体間	○	×	×	×	×
流体-構造材間	○	粒子(q2)のみ○	×	粒子(q2)のみ○	×

(○ : 考慮、× : 無視)

- ◆ 燃料固化モデルは、FUEL CAPS 固化モデルを使用する。
- ◆ 燃料ピンの破損判定条件は、燃料溶融割合 25%に到達するか、あるいは、上下に燃料ペレット喪失かつ当該セルとその上下セルの被覆管が喪失していることを条件に、破損と判定した。(&XCNTL HMTOPT(66)=5)
- ◆ ガスプレナム被覆管内への燃料の侵入を模擬するため、上部及び下部軸ブランケット燃料（以下、下部軸ブランケット燃料を LAB と記す）が破損する時点で、ガスプレナム内断面積を流路としてガスプレナム内断面積を流路に開放する一方で、水力等価直径を保存するために、接触ピン表面積を倍にする。
- ◆ 有意な FCI の発生を抑制するため、燃料破損以降において、炉心燃料領域から下方（冷却材入口側）の冷却材の圧力を保存するように FP ガスに置換している。
- ◆ 液相燃料と液相スチールを同一速度場に割り当てることにより、液相燃料と液相スチ

JNC TN9410 2002-016

ールの熱伝達が悪くなる問題を回避するため、本検討では、液相燃料と液相スチール間の熱伝達係数を 1000 倍することにより、両者の混合を模擬した。

4. 集合体評価

4.1. 目的

ABLE 集合体 (Axial Blanket Eliminated: 軸ブランケット削除型集合体) の設計の目的である、上下軸ブランケットを削除部分からの破損燃料を炉心領域外あるいは集合体外への排出促進効果を、集合体規模で確認し、再臨界回避方策としての有効性を評価することを目的とする。燃料排出促進効果の有無を明確するため、比較対象として、通常集合体及び LAB のみ一部削除型集合体についても併せて評価する。

4.2. 解析条件

(1) 解析体系

単一集合体の燃料移動挙動に着目するため、図 5 に示すように、径方向 6 メッシュ、軸方向 77 メッシュの解析体系として、集合体内を詳細に分割する。特に、炉心入口プレナム側への燃料流出に着目するため、下部ガスプレナム領域のメッシュサイズは、約 3cm とする。

(2) 解析コード

二次元多相多流体解析コード SIMMER-III(ver.2H,CSF52,AFF15)の熱流体力学計算部を使用する。

(3) 解析コード

解析対象として、P/F 値が 1~1.36 の集合体を代表集合体とした。図 6 に、評価対象炉心の SAS4A チャンネル配置図を示す。P/F 値の高い集合体は、SAS4A チャンネルの Ch52 (P/F 値が 1.361) とする。Ch52 は、炉心中心から 9 リング目に配置されている、サイクル 1 の集合体である。

(4) 初期条件及び過渡条件

a. 初期条件

冷却材流量は、解析上、集合体入口部にオリフィス係数を想定することにより、定格運転状態の流量を模擬している。また、燃料平均温度は、燃料熱伝導度を調整し、SAS4A 解析結果と同様な温度分布を得ている。

b. フローコーストダウンカーブ

流量半減時間 5.5 秒のフローコーストダウンを想定する。

c. 出力履歴

図 7 に示す SAS4A 解析結果による出力履歴を、テーブル入力として与える。基準ケースは、出力ピーク 47Po、LOF 開始からの投入エネルギーが約 33FPS の出力履歴とし、出力高ケースとして、出力ピーク 142Po、LOF 開始からの投入エネルギー約 46FPS の出力履歴を想定する。

(5) 解析ケース

下記のように解析ケースを想定する。

a. 集合体

ABLE 集合体、 UAB 付き ABLE 集合体、 通常集合体

b. 投入出力

基準出力(~33FPS 相当)、 高出力(~46FPS 相当)

4.3. 燃料流出マップの作成と燃料流出メカニズムの解明

ABLE 集合体、UAB 付き ABLE 集合体、通常集合体の燃料流出挙動の特徴を明らかにし、出力投入後に炉心領域に残留する燃料量を炉心平均エンタルピーとの相関でまとめ、燃料流出マップを作成する。

(1) 分散終息時点の炉心燃料残留割合

ABLE 集合体、LAB 一部削除型集合体及び通常集合体における燃料流出挙動の計算結果を、まとめて図 8 に示す。燃料分散がほぼ終息する時点での炉心燃料領域に残存する燃料の割合を、図 9 に燃料流出マップとして示す。基準出力ケースの範囲では、ソリダスエネルギー近傍では ABLE が最も炉心燃料の分散を促進しているため残留燃料割合は小さく、約 1.1MJ/kg 以上では、UAB 付き ABLE が最も燃料分散が顕著である。いずれも、通常集合体と比較すると、燃料分散促進効果があることは明らかである。ABLE,UAB 付き ABLE とともに、リキダスエネルギーを超過すると、残留燃料割合は一割を残して一定となり、これ以上の分散は見られない。また、通常集合体でも、このような高エネルギー範囲では、燃料排出が見られる。燃料のエンタルピーレベル毎に、燃料流出挙動の特徴を説明する。

a. 燃料エンタルピーがリキダス以上の場合

UAB 付き ABLE、ABLE とともに、炉心領域のエンタルピーがリキダス点以上を確保できれば、燃料破損から約 12 秒経過後には、炉心領域から初期燃料の 90%以上を排出できる。UAB 付きの場合、ほとんどの燃料は下部端栓上に堆積。ABLE の場合は、上方へも燃料流出するため、約 6 割程度が下部端栓上に堆積する。上記のマップから、基準出力ケースにて燃料エンタルピーのピーク値がリキダスを超過する集合体の P/F

値は、1.30 程度と推定される。径非均質炉心において、**P/F 値 1.30 以上の集合体は全炉心の約 3%のみである。**

b. 燃料エンタルピーがソリダス以下の場合

燃料は低エンタルピーのため破損燃料の多くは粒子であり、下方の未破損燃料バンドル部や、UAB 部に侵入した後閉塞を生じ、ほとんど炉心領域外への分散はない。上記のマップから、基準出力ケースにて燃料エンタルピーのピーク値がソリダス相当の集合体の P/F 値は、1.12 程度と推定される。径非均質炉心において、**P/F 値 1.12 以下の集合体は全炉心の約 74%程度である。**

c. 燃料エンタルピーがソリダス以上リキダス未満の場合

当該範囲では、UAB 付き ABLE は、ABLE よりも炉心領域に残存する燃料量が少なく、よい燃料分散を示している。この理由は、ABLE 集合体では、燃料破損直後の高温の液相燃料は UAB 削除部分を通して先行的に上方へ分散するため、残存した燃料で LAB 削除部分から下方へ流出しなければならない。一方、UAB 付き ABLE では、上方は UAB 部分で閉塞を生じるために、破損燃料は排出できず、ABLE の場合と比較して高温の燃料は炉心領域に残存する。また、炉心領域内の圧力も、下方へ燃料流出しながら低下するため、ABLE と比較して、圧力ピーク値は同程度であるが、高圧が持続する時間が長く、破損燃料を下方へドラッグする効果大きい。上記のマップから、基準出力ケースにて燃料エンタルピーのピーク値がソリダス以上、リキダス未満の集合体は、**全炉心の約 23%程度である。**

上記の結果から、破損燃料を炉心領域外へ排出可能な集合体は、炉心エンタルピーがソリダス以上である必要があり、そのための P/F 値は 1.12 以上である。径方向非均質炉心では、全炉心の約 26%の燃料集合体に相当する。再臨界回避を達成するためには、30%以上の燃料を炉心領域外へ排出させる必要があり、燃料が可動となる約 26%の集合体では、内蔵する燃料のほぼ全量を流出しなければならない。従って、起因過程における基準出力程度のエネルギー投入では、ABLE による再臨界回避の有効性はボーダーライン上にあることが示唆された。

(2) 炉心燃料量の推移

基準出力ケースにおける、ABLE 集合体、UAB 付き ABLE 集合体、通常集合体での炉心燃料領域に残留する燃料量の推移を比較して、図 10 に示す。

a. ABLE 集合体の場合

P/F 値約 1.30 以上の集合体では、炉心燃料は上下方向に分散しているが、P/F 値約 1.24 以下では、炉心燃料下端の燃料が未破損のまま残存するため、破損燃料は下方へ流出しない。UAB 付き ABLE 集合体の場合と比較して、燃料排出速度が遅い原因は、ABLE で

は、上方への燃料流出パス（UAB 削除部分）が下方に先行して形成されるため、高温の破損燃料は上方へ流出し、炉心領域の燃料エンタルピーが低下して、下方へ流出が困難となること、上方への流出パスが形成されることによって、駆動圧となる炉心領域内の圧力が低下することなどが考えられる。

b. UAB 付き ABLE 集合体の場合

P/F 値約 1.24 以上の集合体では、炉心燃料の分散が顕著であるが、P/F 値が 1.18 以下の集合体では、ほとんど分散していない。後者の場合には、炉心燃料下端の燃料が未破損のまま残存しており、破損燃料が侵入しても、固化・閉塞を生じて、下方へ流出しないためである。また、P/F=1.36 の場合では、約 41 秒において急激に燃料排出が進むが、これは、通常集合体の LAB 下側に燃料が回り込んで、径方向に燃料移動が拡大したためである。

c. 通常集合体の場合

最大 P/F 値 1.36 の集合体の場合でも、炉心領域の燃料量は約 10%程度の低下に止まり、流出した全ての燃料は UAB 領域のピン束間に侵入し、固化している。

4.4. 再臨界回避方策の最適化検討

再臨界回避方策の燃料流出挙動の特徴を踏まえ、さらに燃料流出を促進させるための改良案として、炉心燃料の下端を削除する場合、下部ガスプレナム領域の短尺化する場合、通常ピン束の LAB を短尺化する場合を想定し、ABLE 集合体及び UAB 付き ABLE 集合体を対象に評価した。図 11 に、解析対象とした再臨界回避方策の改良案を示す。また、解析結果を ABLE 集合体、UAB 付き ABLE 集合体毎にまとめて、図 12 に示す。

(1) 炉心燃料の下端を削除

炉心領域下端の燃料を削除することにより、破損燃料の移動開始を早めることが可能である。また、炉心領域下端の燃料は、比較的低温であるため、削除することによって、融体先端部の温度を低下させず、流出エネルギーを高いまま保持することが可能である。ABLE 集合体の場合、炉心燃料下端を削除することにより、最大 1.5 秒程度、炉心燃料の排出が早まる。燃料分散開始直後は、炉心燃料下端を削除した効果が小さく見えるが、ABLE 集合体の場合は、先行して上方へ燃料流出し、重力で下方へ流出するためである。40 秒以降が、燃料排出が停止したように見えるが、通常ピンの健全な炉心燃料下端のみが残存し、BFC を削除しない場合と比較して、燃料流出を促進させたために、炉心燃料領域の燃料エンタルピーが低く推移し、通常ピンの健全な炉心燃料下端は 49 秒まで破損しないためである。一方、UAB 付き ABLE 集合体の場合、流出促進効果に差異が見え始める時刻は、ABLE 集合体と同様に破損後 1 秒程度経過した後である。UAB 付き集合体

では、炉心領域内に高圧力が持続するため、炉心燃料下端を削除する効果は ABLE 集合体よりも顕著に現れており、最大 3 秒程度、炉心燃料の排出が早まる。しかしながら、 $P/F=1.12$ 程度の低 P/F 値集合体では、炉心燃料下端に未破損燃料が残って下方への流出を抑制するため、効果が現れていない。従って、ABLE 集合体、UAB 付き ABLE 集合体ともに、燃料流出を促進する効果があり、高 P/F 集合体の場合、最大 1.5~3 秒程度燃料流出を早めることが可能であり、特に、下方にのみ燃料を流出させる UAB 付き ABLE 集合体の場合は顕著である。低 P/F 集合体の場合にも、若干の燃料流出促進効果がある。

(2) 下部ガスプレナム領域の短尺化

下部ガスプレナム領域を、実機設計 84cm を 9cm に短尺化した。被覆管熱容量によるピン束間での燃料閉塞・固化を抑制し、燃料排出を促進することが目的である。なお、集合体内の冷却材流れや流量調整への影響に鑑み、内蔵する燃料ピン全てについて、下部ガスプレナム領域を短尺化した。ABLE 集合体の場合、燃料分散開始から 3 秒間は、下部ガスプレナム領域を短尺化した効果は小さく、その後は反対に、燃料排出を抑制する方向に働くことが明らかとなった。下部ガスプレナム領域を短尺化することで、下部端栓が LAB の下約 10cm の位置に設置されるため、下部端栓上に破損燃料が堆積し、却って燃料流出を遅らせている。UAB 付き ABLE 集合体の場合は、最大 1 秒程度、炉心領域の燃料の排出を早める効果があるが、ABLE 集合体と同様に、燃料分散開始から約 3 秒後は下部端栓上に破損燃料が堆積して、更なる燃料流出を抑制している。従って、最大 P/F 値の集合体においても、下部端栓上に破損燃料が堆積し、燃料流出を抑制していることを考慮すると、再臨界回避方策としては不適合と考える。

(3) 通常ピン束部の LAB 短尺化

UAB 付き ABLE 集合体では、中央の破損燃料が LAB 削除部分を通して通常ピン LAB 下端位置を越えると、破損燃料は径方向へ移動し、通常ピン下側の被覆管を溶融侵食する。この時点から、炉心領域の燃料量低下は顕著になっており ($P/F=1.36$ の集合体の場合は、約 41 秒の時点)、通常ピン LAB 下側への破損燃料の到達が、UAB 付き ABLE 集合体の燃料流出に大きく影響していると考えられる。従って、通常ピン LAB の軸長を 1/2 程度に短尺化して、効果の有無を確認する。通常ピン束の LAB を短尺化した場合、短尺化しない場合よりも、破損燃料は、通常ピンの下部ガスプレナム部へ 1 秒以上早く移動し、軸方向燃料流出も 1 秒程度早まっている。通常ピン束への回り込みによって、燃料流出が促進される効果があることが明らかとなった。従って、通常ピン LAB 短尺化は、BFC 削除と同等の燃料流出促進効果があり、有効である。但し、通常ピン LAB 下端まで融体が到達しなければ、流出促進効果が現れないため、低 P/F 値の集合体には効果が期待できない。

4.5. まとめ

集合体規模での再臨界回避方策の有効性を評価した結果を以下に記す。

- ABLE ピンの UAB 削除部分からの燃料再流入や、燃料流出量を考慮すると、UAB 付き ABLE の方が、ABLE よりも燃料流出先が明確で、燃料流出量が多いことから、再臨界回避の観点から有効である。
- 但し、ABLE の方が、燃料破損直後の分散速度は速いため、燃料流出量と、ラップ管壁の熔融破損との競合過程を考慮すると、径方向プール形成を抑制する観点からは、ABLE の方が優れている。
- 径非均質炉心において、出力がノミナル相当である場合、ABLE,UAB 付き ABLE とともに、燃料排出を促進する効果はあるが、全炉心の 30%排出の達成は、ボーダーライン上にある。
- 引継時の炉心状態は大部分の燃料は可動性の低い粒子状であるが、分散燃料の落下などによる反応度印加があれば、再臨界回避を達成できる可能性がある。
- ABLE 炉心、UAB 付き ABLE 炉心について全炉心評価を実施して確認すると共に、燃料流出促進を向上する方策についても、評価を実施する予定。

5. 全炉心評価

5.1. 目的

炉心損傷事故の遷移過程では、ラッパ管の溶融貫通が生じ、溶融燃料の径方向移動が開始する。溶融燃料の径方向移動は、燃料コンパクションを誘発するため、即発臨界を超過するバーストの原因となる。ABLE 集合体は、ラッパ管壁の溶融貫通前に軸方向へ燃料を排出することによって、深い未臨界状態にしようとする CMR 概念に基づく再臨界回避方策の一例である。ABLE 集合体を内蔵した炉心に対し、遷移過程シナリオや燃料流出メカニズムを明らかにし、再臨界回避の有効性を評価する。また、通常炉心、UAB 付き ABLE 炉心の場合と比較を行う。冷却材沸騰から燃料破損までの現象と核的挙動の模擬に実績のある炉心損傷解析コード SAS4A にて対象炉心を解析した結果を引継ぎ、SIMMER-III にて遷移過程を解析する一貫解析を実施する。ABLE 炉心、UAB 付き ABLE 炉心において、再臨界回避を有効にするための条件や検討課題を明確にする。

5.2. 再臨界回避達成目標と判断条件

燃料の径方向運動による即発臨界超過を回避するためには、下記の再臨界回避達成目標をクリアしなければならない。すなわち、**限界プールの形成以前に、有意な量の燃料を、あらかじめ設定された燃料排出経路から、炉心外へ排出する。**ここで、限界プールとは、自励的スロッシングによって、即発臨界を超過し、厳しいエナジェティクスに至る可能性のある燃料プールを指す。この達成目標を満たすための判断条件として、FAIDUS 炉心などの既往炉心評価研究[7], [8]から、**燃料プールが実効プール断面積 30%未満のうちに、30%の燃料量を炉心外へ排出することが、要求される。**この判断条件を用い、ABLE 炉心及び UAB 付き ABLE 炉心の有効性評価を実施する。

5.3. 解析条件

代表事象として、冷却材流量低下型スクラム失敗事象 (ULOF 事象) を選定する。

(1) 起因過程評価対象ケース

a. SAS4A 解析体系

SAS4A コードでは、燃料交換バッチ、出力/流量比が類似した燃料集合体数体をまとめて扱い、その単位をチャンネルと呼んでいる。本研究の評価対象である径非均質炉心の場合では、内部ブランケット燃料集合体及び径ブランケット燃料集合体を含め、192 チャンネル体系で起因過程評価を実施している。図 6 に、SAS4A のチャンネルを割り当てた 1/3 炉心図を示す。

b. SAS4A 解析結果

解析には、SAS4A コード最新バージョンである、SAS4A. Ref99Rel3 を使用している。代表ケースとして、最大ボイド反応度 5.8\$（反応度係数ノミナル）でかつ燃料落下とスタブモーションを考慮した、最も現実に近いと考えられるケースを選定した。起因過程の反応度履歴及び出力履歴を図 13 に示す。最大出力は 130Po, 最大反応度は、0.96\$まで上昇する。

c. 引継条件

SIMMER-III への引き継ぎ時点は、LOF 開始後 18.37 秒とした。この引継タイミングを選定した理由は、下記の二点である。

- ◆ 燃料の軸方向移動に起因する第二バーストは、SAS4A コードで模擬
- ◆ ラッパ管が溶融貫通を開始する前

引継時点での出力及び反応度は、それぞれ 3.35Po,-0.16\$であり、炉心平均温度は、2804 Kである。炉心領域内は、全域に渡ってボイド化し、全炉心の 65%が溶融破損している状態である。(図 14 参照)

(2) チャンネル縮約について

SIMMER-III にて、遷移過程解析を実施するにあたり、SAS4A 解析結果を SIMMER-III の入力形式に変換する必要がある。SAS4A-SIMMER-III 接続コード SAME-II はこのような一貫解析を実現するために、作成されたコードである。また、SAME-II は、SAS4A の複数チャンネルデータを縮約して、SIMMER-III セルデータに割り当てる機能も持つ[10]。燃料集合体は、SAS4A では 192 チャンネル解析体系としているが、計算資源の節約のため、SIMMER-III では 12 リングに縮約した。(内部及び径方向ブランケット燃料集合体を含む)

縮約は、下記二点に着目して実施した

- ◆ 各集合体については、極力実際の配置を模擬し、SIMMER-III 解析がR-Z二次元体系で行われることを考慮して、図 15 に示すようにリング状に縮約する。制御棒集合体の配置も、現実的な配置を模擬する。
- ◆ 但し、燃料集合体のうち、燃料破損チャンネルと燃料未破損チャンネルは計算不安定性を生じることから、分けて縮約する。

また、ABLE 集合体を模擬するために、SIMMER-III の径方向メッシュの3セル分を1集合体リングとし、3セルのうち中央のセルをABLEピンバンドルとした。

(3) 解析コード

二次元多相多流体解析コード SIMMER-III (ver. 2J)を使用する。核計算には、二次元輸送計算コード TWODANT を使用した。

(4) 解析モデルの整備及びパラメーター値の設定

引き継ぎ時の粒子粘性係数 CPVISI は、重力による燃料コンパクションを保守的に評価するために、炉心領域内では零とし、炉心領域外については半経験式から求められた値 5.0 とする。CRGT 下端のオリフィス係数は、引き継ぎ時には低圧プレナムと高圧プレナムの圧力は同程度と考え、燃料集合体と同じ値とする。

5.4. ABLE 有効性を支配する因子

ABLE 集合体の燃料流出挙動の特徴は、燃料自らのエンタルピーで排出経路を形成することである。従って、燃料の可動性、ピン束間への燃料侵入挙動、流出先の構造材熱容量特性、燃料落下によるエネルギー投入、駆動圧などが、燃料排出挙動に重要な因子となる。特に、燃料の可動性については、燃料エンタルピーレベルで代表され、影響も大きいことから、次章の遷移過程シナリオとして記載している。その他の因子については、パラメーター解析として、5.5.1(4)節に、影響評価の結果を記している。

5.5. 遷移過程シナリオ

ABLE 集合体、UAB 付き ABLE 集合体をそれぞれ内蔵した炉心について、燃料の流出促進効果による再臨界回避の有効性を評価する。比較のために、通常集合体を内蔵する炉心でも、評価を実施した。

5.5.1. ABLE 炉心

上下軸ブランケット燃料を一部削除した ABLE 炉心における燃料流出挙動の特性を明らかにし、再臨界回避の有効性を評価する。

(1) ABLE 炉心シナリオ

ABLE 炉心の場合の遷移過程評価結果を、まとめて図 16 に示す。ABLE 炉心では、軸ブランケット削除部分の被覆管を熔融して排出経路を燃料自らが形成し、燃料排出を促進する。反応度、出力は順次低下して、即発臨界に至ることなく、引き継ぎ後 10 秒には十分な未臨界状態に至る。しかしながら、CRGT 破損時までには、30%の燃料量を排出することは困難であることが明らかとなった。崩壊した炉心燃料の 1/3 は、一旦上方へ分散し、ピン束上部へ堆積する。ピン束上部へ排出された燃料は、計算上の想定では、UAB が崩壊し、かつラップ管の熔融破損が生じた場合のみ、炉心領域に最流入する。引き継ぎ時間 10 秒では、このような事象はまだ生じていない。CRGT 壁破損時には、FCI

によって約 10~15 気圧のナトリウム蒸気圧が発生するが、炉心内の燃料エンタルピーがソリダス以下であるために、CRGT からの燃料排出がほとんど無い。

解析は、判断条件である限界プール断面積以上の燃料プールの形成を許容して、継続した。引き継ぎから 10 秒経過後には、炉心領域の燃料は 59%まで減少し、炉心上方に 29%、下方に 8%が移行している。10 秒後の反応度は約-38\$、出力は約 0.2Po まで低下し、炉心は十分な未臨界状態に到達する。時間を追って、事象推移を説明する。

0.0 秒 燃料はほとんどが粒子状態であり、炉心領域の下側及び外側炉心には、未破損燃料ペレットが残留する。引き継ぎ直後から燃料は、比較的高温の上部軸ブランケット削除部分の被覆管を熔融して、燃料流出を開始する。この燃料の早期排出によって、初期の燃料落下に起因するバーストは緩和される。

1.0 秒 分散燃料の落下による反応度印加と、再分散を繰り返す。ラップ管壁が熔融し、燃料の径方向運動が開始する。

3.0 秒 第 1 CRGT 壁が破損し、FCI が発生する。ナトリウム蒸気圧に駆動されて、軸ブラ削除部分からの燃料流出が促進される。部分プールが形成され、旋回流が発生する。上方へ分散した燃料は、主にピン東上部に堆積する。

10.0 秒 内部ブランケット燃料に分断された、部分プールが形成される。約 3 割の燃料は、ピン東上部と上部ピン東間に移行し、約 1 割の燃料は、下部ガスプレナムと LAB ピン東間に移行する。炉心は十分な未臨界状態に到達する。

計算は 10 秒で停止したが、10 秒以降の事象推移を予測すると、ラップ管壁はほぼ熔融して、UAB も崩壊する。ピン東上部に堆積した分散燃料は、UAB 崩壊とともに、炉心領域へ落下する。UAB を内包した燃料落下であるため、再臨界を超過するほどのポテンシャルは無いと考える。その後は、長期的な PAMR 過程へ移行する。

(2) 燃料エンタルピーに着目したシナリオの整理

ABLE は、崩壊燃料のエンタルピーを使って、被覆管を熔融し、自ら排出経路を形成する方策である。従って、燃料の排出挙動は、燃料エンタルピーと密接な関係があり、崩壊燃料を取り込んだ流体の熱容量や運動量、被覆管の熱容量との競合過程で決まる。また、駆動圧や流体先端部の状態、径方向通常ピン東部への侵入などにも影響される。本節では、ABLE 有効性に関わる事象推移の不確かさのうち、特に燃料エンタルピーレベルに着目し、シナリオを整理した。また、投入エネルギーによる整理や、既往評価の

FAIDUS 炉心（内部ダクト型炉心）との燃料流出挙動の比較も実施した。

(i) 高エンタルピーシナリオ

遷移過程初期に燃料エンタルピーがリキダス点近傍まで上昇しているような、高エンタルピー炉心を想定する。引き継ぎ直後に、外部反応度 10\$ を反応度挿入率 40\$/s で投入することで、高燃料エンタルピーの炉心状態を作成した。投入エネルギーは約 8.6FPS である。

図 17 に、高エンタルピー炉心の場合の出力・反応度履歴、燃料・スチールエンタルピーの推移、燃料の流出挙動、炉心状態などをまとめて示す。外部反応度投入によって、引き継ぎ後約 0.1 秒には、反応度は約 1.08 \$、出力は約 2300P/Po まで上昇する。各領域の燃料は、平均エンタルピーがリキダス点近傍まで上昇して可動性を増す。外部反応度により燃料破損が生じるため、FP ガスが最大 60 気圧発生する。これを駆動圧として、燃料は軸ブランケット燃料削除部分から、選択的に排出される。出力及び反応度は、初期の外部反応度によるピーク出現の後には、有意なバーストなく、速やかに低下している。計算終了時間（引継後 2 秒）では、炉心領域に残留する燃料量は約 25% であり、分散した燃料は上方及び下方へ均等に配置している。

本ケースでは、CRGT 壁が破損を開始する引継から約 0.8 秒後よりも前（引継から約 0.6 秒後）に、炉心燃料の 3 割が炉心領域から排出される。従って、有意なプール形成以前（CRGT 破損以前）に有効な燃料量を炉心領域外へ排出という判断条件を満たしているため、高エンタルピーシナリオの場合は、ABLE は有効に機能することが明らかとなった。

(ii) 低エンタルピーシナリオ

遷移過程初期の燃料エンタルピーがソリダス点近傍の、低エンタルピー炉心を想定する。SAS4A 解析結果の物質配位に則した反応度及び出力を考慮した。投入エネルギーは約 4.6FPS である。

図 18 に、低エンタルピー炉心の場合の出力・反応度履歴、燃料・スチールエンタルピーの推移、燃料の流出挙動、炉心状態などをまとめて示す。引継初期には、燃料落下による反応度投入は見られるが、反応度は最大約 0.4\$、出力は最大 5Po に止まる。各領域の燃料エンタルピーは、引継時はソリダス点近傍であるが、スチールとの熱交換によって、時間の経過とともに低下する。このため、燃料の可動性は低下して燃料粒子が多くなり、燃料粒子は溶融スチールに取り込まれつつ、分散する。（*節 被覆管の溶融侵食による燃料流出モード参照）CRGT 壁破損時には、最大 13 気圧のナトリウム蒸気圧 (FCI 圧力) が発生し、これを駆動圧として、燃料は軸ブランケット燃料削除部分から、選択

的に排出される。出力及び反応度は、有意なバーストを生じることなく、順次低下する。計算終了時間（引継後 10 秒）では、約 59%まで炉心領域の燃料量は減少し、上下にそれぞれ 29%、8%分散する。

本ケースでは、引継後約 3 秒で CRGT 壁が破損を開始するが、同時刻での炉心領域に残存する燃料量は約 2 割である。約 3 割の燃料を炉心領域外へ排出するためには、約 4.5 秒を要する。従って、本ケースでは、CRGT 破損後も、即発臨界に至ること無く、出力及び反応度は低下し、十分な未臨界状態に到達している。しかしながら、CRGT 破損以前に炉心燃料量の 3 割を排出する判断条件を満たしておらず、燃料の運動の不確かさなどを考慮すると、即発臨界の可能性は否定することは、困難であることが明らかとなった。

(iii) 投入エネルギーとの相関マップ

炉心領域の燃料量を投入エネルギーとの相関で整理すると、図 19 のように示すことができる。核的整定条件を満たすためには、遷移過程で約 7FPS の投入エネルギーが必要である。

(iv) FAIDUS 炉心との比較

ABLE 炉心の燃料流出挙動と、内部ダクト型集合体を採用した FAIDUS 炉心評価結果[7]からの燃料流出挙動を比較して、図 20 に示す。集合体毎のエンタルピーと燃料残留割合の関係を比較すると、ソリダスエネルギー、リキダスエネルギーを基準に燃料流出量に変化する特性は、両炉心ともほぼ同じであることが明らかとなった。また、炉心投入エネルギーと燃料残留割合の関係を比較しても、両炉心は、ほぼ同一な特性を示している。図 20 から、低エンタルピーレベルでは、ABLE 炉心と同様に、FAIDUS 炉心でも再臨界回避に十分な燃料排出ができない特性を持つことが示された。これは、一定のエネルギー投入を前提として提案された CMR 共通の課題である。核的整定条件を満たすためには、FAIDUS 炉心でも遷移過程で約 8FPS の投入エネルギーを要し、この値は前節の ABLE 炉心の場合と近似している。

(3) 詳細な ABLE 集合体内の燃料挙動の分析

ABLE 炉心の評価では、燃料エンタルピーの最大値がソリダス点近傍であり、燃料の可動性が低いにも関わらず、炉心領域の燃料は徐々に排出され、即発臨界に至ることなく、未臨界状態に到達している。ABLE は、崩壊燃料自身が被覆管を溶融侵食することによって、流路を拡大しつつ炉心外へ燃料を排出し、その過程で溶融スチールと混合することによって、燃料エンタルピーが低下すると考えられる。しかしながら、SIMMER-III

計算結果では、このような低エンタルピー燃料でも、被覆管を溶融侵食することによって、燃料排出が可能であることが明らかとなった。図 21 に低エンタルピー燃料の流出挙動の調査結果を示す。

図 21 (1)は、UAB 削除部分への燃料流出挙動を被覆管と燃料粒子の体積率で表したものである。流出の過程で取り込まれた高温の溶融スチールは、可動性を失った燃料粒子と被覆管の熱伝達の媒体となり、被覆管を溶融する。被覆管が溶融破損して流路が開放されると、燃料粒子がこの部分に移動し、徐々に炉心外へ移動する（図 21 (2)流出メカニズム参照）。下方への流出も同様のメカニズムである。燃料粒子と液体スチールから成る流体は、スチールをさらに巻き込みながら、順次下流側の被覆管を溶融して流出する。このため、図 21 (3)に示すように、流体先端部のスチール割合は上昇し、被覆管を溶融する熱量を失った位置で、閉塞・固化する。図 21 (4)に示すように、駆動圧はナトリウム蒸気圧であり、CRGT 壁破損時の FCI や、下方のピン束部に残留する液相ナトリウムと流体との接触による FCI が主な発生原因である。

このような燃料流出モードは、低エンタルピー燃料の形状や可動性、ピン束部への侵入挙動など、解析コードの想定に大きく依存している。現実的に起こりうる現象か否かについては、詳細メッシュ解析を含むパラメーター解析を実施した上で、最終的には実験による確認が必要と考える。

(4) ABLE 有効性を支配する因子の影響

ABLE の有効性を支配する因子は、燃料の可動性、ピン束間への燃料侵入、燃料落下によるエネルギー投入、駆動圧である。燃料の可動性については、燃料エンタルピーに着目した検討を行い、5.5.1(2)節で述べた。ピン束間への燃料侵入、燃料落下によるエネルギー投入について、それぞれ保守側設定としてパラメーター解析を実施し、エネルギー投入の影響や、ABLE 効果の有無を評価した。

(i) ピン束間への燃料侵入

● 燃料の初期侵入抑制

ABLE 炉心では、引き継ぎ後初期から燃料は軸ブランケット削除部から選択的に排出されるため、出力は低く推移する。しかしながら、低エンタルピー燃料のピン束間への侵入は、不確かさが大きく、ピン束部の入口で閉塞を形成して流出を阻害する可能性もある。本ケースでは、低エンタルピー燃料が初期にピン束間へ侵入しない場合を想定し、引き継ぎ初期から炉心領域をバーチャルウォールで囲んで、炉心外への燃料排出を制限した。その後、燃料の落下によるバースト後にバーチャルウォールを開放し、燃料の流出挙動を確認した。

図 22 に解析結果を示す。バーチャルウォールは、引継後 0.1 秒に開放した。その間に、燃料落下により最大反応度 1.08 \$、最大出力 3130Po のバーストが出現する。燃料の炉心平均エンタルピーは、リキダス近傍まで上昇して液相となる。バーチャルウォールの開放とともに、燃料は炉心外へ流出し、CRGT 破損開始までに 28%の燃料を炉心外へ排出する。従って、低エンタルピーシナリオの場合にも、初期の燃料侵入が抑制される場合には、ABLE は有効に機能すると言える。

● ABLE ピン束本数低減

燃料の早期排出を抑制するため、設計因子である ABLE ピン束本数を低減して影響を評価した。炉心仕様では、約 1 割の 37 本の燃料ピンを ABLE ピンとしていたが、本ケースでは、約 0.5 割の 19 本のみを ABLE 化する。ABLE ピン本数の低減によって、引継初期の燃料落下による燃料のエンタルピーが増大する一方、排出経路である軸ブラ削除部分も減少するために、どちらの効果も大きいかを把握する必要がある。

図 23 に解析結果を示す。ABLE ピン束の減少によって、初期の燃料落下による出力バーストが*Po から 93Po まで上昇する。これによって、燃料のエンタルピーは若干増大するが、ソリダス未満を推移するため、燃料流出に対して影響は小さい。約 1.9 秒に CRGT 壁の破損が開始するが、この時点までの燃料排出量は、高々15%程度である。基準ケースでは、CRGT 壁破損時点までに、約 2 割の燃料を排出することを考慮すると、ABLE ピン束低減による燃料排出促進効果は小さいと言える。

(ii) 燃料落下によるエネルギー投入

● 燃料の同時落下によるコンパクション効果

ABLE 炉心では、上下双方向へ燃料は分散する。上方に分散した燃料は、ピン束間及びピン束上部に堆積し、徐々に被覆管及びラップ管を溶融侵食して、いずれは、落下するものと考えられる。仮に、引継初期の未臨界度が浅い炉心状態において、上部分散燃料が同時に落下する場合の即発臨界超過への影響を評価した。同時落下開始時刻は、炉心内圧力が低下し、未臨界度が比較的浅い引継後 4 秒とした。この時刻での出力は 0.29Po、反応度は-13 \$ である。

図 24 に解析結果を示す。最大 3 割の燃料が落下し、反応度は最大 20\$投入されるが、落下速度が有意ではなく、十分な未臨界に至った後の反応度投入であること、燃料落下の際、UAB が混合するために、炉心のエンタルピーを低下させることなどから、引継後 10 秒間においては、有意な反応度印加とならないことが明らかとなった。

● 内部ブランケット燃料の崩壊

評価対象炉心は径非均質炉心であるため、3リング計 96 体の内部ブランケット燃料集

合体が内蔵されている。内部ブランケット燃料は、融点が MOX 燃料に比べて 3120 K (UO₂) と高く、出力分担率が低く設計されているため、基本的には、崩壊しないものとして扱っている。本ケースでは、内部ブランケット燃料の被覆管が、溶融した時点で崩壊することを想定した。内部ブランケット燃料が崩壊には、全炉心プールが形成されて、燃料プール運動が厳しくなる反応度印加効果と、高融点燃料 UO₂ の混入によって流動性が低下し反応度の低下につながる効果の両方を合わせ持つ。

ABLE 炉心と UAB 付き ABLE 炉心について評価を実施した。図 25 に解析結果を示す。ABLE 炉心の場合、燃料が十分な未臨界状態 (-30\$) に至った後の引継後約 7 秒に、内部ブランケット燃料の崩壊は開始しており、反応度履歴におおきな影響は無い。また、UAB 付き ABLE 炉心の場合は、引継後約 2.5 秒に、内部ブランケット燃料の崩壊が開始するが、反応度は大きく正側にふれることなく低下する。燃料プール運動の効果よりも、熱容量の大きいブランケット燃料の混入によって、炉心内の燃料エンタルピーが低下し燃料可動性の低下した効果が大きい。内部ブランケット燃料の崩壊は、引継後から 2.5～7 秒の時間遅れがあり、その間に、ABLE 効果によって反応度は-10～-30\$ まで低下すること、ブランケット燃料の混入により、炉心燃料エンタルピーが低下し燃料の可動性を低めること、内部ブランケット燃料の崩壊は、被覆管溶融に依存するため、同時性は小さいことなどの理由から、有意な反応度印加要因とはならないと考える。

5.5.2. UAB 付き ABLE 炉心

LAB のみ一部削除した UAB 付き ABLE 炉心における燃料流出挙動のメカニズムを明らかにし、再臨界回避の有効性の有無を評価する。UAB 付き ABLE 炉心の場合の遷移過程評価結果を、まとめて図 26 に示す。UAB 付き ABLE 炉心でも、即発臨界超過のポテンシャルを低減する効果を持つ。しかしながら、CRGT 破損時までに、30%の燃料量を排出することは困難であることが明らかとなった。崩壊した炉心燃料のほとんどは、下部ガスプレナム領域へ堆積する。CRGT 壁破損時には、FCI 発生によって約 10~15 気圧のナトリウム蒸気圧が発生するが、炉心内の燃料エンタルピーがソリダス以下であるため、CRGT からの燃料排出はほとんど無い。

解析は、判断条件である限界プール断面積以上の燃料プールの形成を許容して、継続した。引き継ぎから 10 秒経過後には、炉心領域の燃料は 60%まで減少し、炉心上方に 5% 下方に 31%が移行している。10 秒後の反応度は約-49\$、出力は約 0.2Po まで低下し、炉心は十分な未臨界状態に到達する。時間を追って、事象推移を説明する。

0.0 秒 燃料はほとんどが粒子状態であり、炉心領域の下側及び外側炉心には、未破損燃料ペレットが残留する。引き継ぎ後早期から、燃料は軸ブランケット削除部分を介して下方へ流出し、反応度が順次低下するため

に、初期の燃料落下に起因するバーストは緩和される。

- 2.0 秒 分散燃料の落下による反応度印加と、再分散を繰り返す。第1、第2 CRGT 壁が破損し、FCI が発生する。ナトリウム蒸気圧に駆動されて、下部軸ブラ削除部分からの燃料流出が促進される。部分プールが形成される。
- 5.0 秒 第3 CRGT 壁が破損し、FCI 圧力によって燃料流出が促進される。流出した燃料は、下部ガスプレナム領域に堆積。
- 10.0 秒 約3割の燃料は、下部ガスプレナムと LAB ピン東間に移行し、炉心は十分な未臨界状態に到達する。

5.5.3. 通常炉心の場合

ABLE 炉心、UAB 付き ABLE 炉心での、再臨界回避の有効性を明らかにするために、同じ想定条件で通常炉心の場合を評価した。通常炉心の場合の遷移過程評価結果を、まとめて図 27 に示す。通常炉心では、部分プールが形成されて、旋回流によって短い時間間隔でピークが出現し、引き継ぎから約 3.9 秒経過後に、即発臨界に至る。即発臨界超過時の反応度挿入率は、約 82\$/s である。また、即発臨界直前の炉心領域内に残留する燃料量は 97% である。CRGT 破損時の燃料エンタルピーはソリダス点近傍であり、炉心領域内の圧力は上昇するが、燃料流出はほとんど無い。時間を追って、事象推移を説明する。

- 0.0 秒 燃料はほとんどが粒子状態であり、炉心領域の下側及び外側炉心には、未破損燃料ペレットが残留する。分散燃料の落下による反応度印加と燃料分散による反応度低下を繰り返す。
- 1.64 秒 複数チャンネルでの同時的な燃料落下によって、出力ピークが出現する。燃料径方向運動が開始する。
- 2~3 秒 CRGT 壁が破損し、それぞれの領域で 20~30 気圧のナトリウム蒸気圧が発生する。燃料のエンタルピーはソリダス以下であるため、CRGT からの流出はほとんど無い。
- 3.28 秒 炉心は、内部ブランケットに分断された3つの部分プールを形成する。それぞれのプールで旋回流が発生する。やがて、燃料は液化し、可動性が増大する。
- 3.92 秒 旋回流によって、即発臨界を超過し、炉心膨張過程へ移行する。最大反応度は 1.24 \$、最大出力は 1.6E+4Po まで上昇する。

5.5.4. 静的核計算

(1) 目的

炉心損傷事故の起因過程及び遷移過程において損傷炉心の核的活性度が低下し、急速な事象推移が一旦終息した後は、崩壊熱レベルの発熱によって炉心物質が徐々に炉心の下方の構造材を溶融浸食しながら移動し、事象推移は下部プレナムで冷却固化する事故後物質移行 (PAMR: Post Accident Material Relocation) 過程、及び事故後崩壊熱除去 (PAHR: Post Accident Heat Removal) 過程へ移行する。ここでは、遷移過程から PAHR 過程において予想される代表的な物質配位の反応度変化を評価し、ABLE 集合体による再臨界排除の成立性に関する知見を得ることを目的として、静的核計算による再臨界可能性の検討を実施する。

(2) ABLE 炉心

定常運転状態を基準体系として、SIMMER-III による全炉心解析結果の代表的な物質配位とその後の長期的な物質配位に対して反応度変化を評価する。解析ケースの体系図を図 28 に示す。ケース A1 は ABLE 集合体径方向非均質炉心の全炉心解析結果の 4 s 時点での物質配位を基にして作成した体系で、下部ガスプレナム部に 5%、LAB 部に 3%、炉心部に 72%、UAB 部に 8%、上部プレナム部に 12% の炉心物質を分布させている。ケース A2 以後は、ケース A1 で炉心の上方に分散した燃料の発熱によって構造材が溶融し、重力落下した状態を想定している。各ケースの想定は以下の通りである。なお、内部ダクトは健全であると仮定し、内側炉心と外側炉心も混合していないと仮定した。

ケース A2 : UAB 領域の構造材及び分散燃料が炉心に落下して均一に混合した状態

ケース A3 : UAB と上部プレナム部の構造材と分散燃料が落下して混合した状態

ケース A4 : UAB 領域の構造材及び分散燃料が炉心に落下して炉心物質の上部に堆積した状態

ケース A5 : UAB 領域と上部プレナム部の構造材及び分散燃料が炉心に落下して炉心物質の上部に堆積した状態

反応度の評価には輸送計算コード TWODANT を用いた。断面積の作成は SLAROM～CITATION～JOINT により作成した。使用したライブラリは JFS3J32.ADJ98.Y9902 とし、縮約群数は 18 群とした。

解析結果を表 2 に示す。この表における反応度とは基準体系からの反応度変化である。ケース A1 の反応度は -9.3 \$ であり、SIMMER-III による全炉心解析の 4 s における反応度約 -10 \$ とほぼ対応している。上方の分散燃料と UAB、さらに上方のプレナム部の構造材まで炉心に落下させ均質の混合したケース A2 及びケース A3 の反応度は -28.3 \$ 及び -27.8 \$ と

大きく低下している。これは、混合後の炉心内の混合物の高さが、炉心高さ 100 cm に対して炉心物質の 80%を含むケース 12 で 73.1 cm、92%を含むケース 13 で 85.4 cm となっており、ほぼ健全形状の炉心の流路に UAB 及び構造材を流入させたのと等価な物質配位となっているためである。一方、上方への分散燃料、UAB、上部プレナムの構造材を炉心物質に混合させずに上部に堆積させたケース A4 及びケース A5 では反応度がそれぞれ+0.8\$及び+3.2\$となり、遅発臨界及び即発臨界を超過する。

以上の解析結果から、ABLE 集合体径方向非均質炉心では、CDA の初期の再臨界を回避した場合、炉心上方に分散した燃料が UAB 等と同時に落下する状況を想定すると再臨界が発生する可能性が残っていることがわかる。ただし、上方の分散燃料の落下が非斉時的であり、落下した UAB と分散燃料が順次炉心領域の炉心物質に混入していけば、反応度は上昇することなく低出力のまま中長期的な PAMR/PAHR 過程に移行する。また、本評価では内部ブランケットは健全状態を保つと仮定しているが、これが溶融崩壊して炉心プールに混入することで負の反応度効果を及ぼすことも考えられる。

5.6. 考察

5.6.1. 集合体評価との整合性

4.3 章の集合体評価で作成した燃料流出マップ（図 9）と、7.5 章の全炉心評価結果との整合性を確認した。図 29 に、出力履歴、燃料流出マップ比較、炉心圧力の比較をまとめて示す。この検討では、集合体評価と同様に、起因過程で与えられる燃料エネルギーのみで燃料流出することを想定した。ABLE 炉心を対象に、図 29 (1)に示すように起因過程でのバースト直後の出力履歴を 0.1Po 一定として、解析を実施した。図 29 (2)に示すように、燃料流出マップに全炉心解析結果を重ねると、燃料エンタルピーに対する燃残留割合はほぼ一致することから、集合体評価と全炉心評価は、整合性があると言える。全炉心評価結果のうち、C1 領域では、集合体評価結果よりも若干多く燃料が排出されている。これは、図 29 (3)に示すように、集合体評価では、FCI の不確定性を除くために、ナトリウム蒸気圧を過小評価していることに起因する。

5.6.2. 炉心の ABLE 化による燃料流出量の予測

起因過程で得られた投入エネルギーで燃料流出することを想定し、評価対象とした径方向非均質炉心の他に、実証炉及び炉心軸長 80cm の均質炉心を ABLE 化する場合の燃料流出量を予測する。図 30 に、引き継ぎ時の燃料エンタルピーと集合体割合の関係を示す。燃料流出マップから、本研究で評価対象とした径方向非均質炉心、実証炉、80cm 均質炉心を ABLE 化した場合を想定し、引き継ぎ時のエンタルピーと集合体割合から燃料流

出量を確認した。なお、引き継ぎ時の燃料平均温度は、それぞれ、2804K、3016K、2766Kである。

径方向非均質炉心の高エンタルピーシナリオの場合には、炉心燃料エンタルピーはリキダス近傍であり、約 9 割の燃料が排出される。これは、再臨界回避に十分な燃料量である。また、低エンタルピーシナリオの場合には、炉心燃料エンタルピーがソリダス近傍であり、約 2 割の燃料流出に止まるため、再臨界回避は困難である。実証炉の場合は、引継ぎ時の燃料エンタルピーが高いため、約 4 割の燃料を炉心外へ排出することができる。これは、再臨界回避に十分な燃料量である。80cm 均質炉心の場合には、引継ぎ時の燃料エンタルピーがソリダス点近傍であり、数%の燃料排出しか見込めず、再臨界回避に必要な燃料量(約 3 割)の排出は困難である。しかしながら、実際には、燃料落下など遷移過程でもエネルギー投入があり、径方向非均質炉心の低エンタルピーシナリオでは、約 4 割の燃料が排出されている。このことから、特に低エンタルピーシナリオで、ABLE が有効に機能するためには、遷移過程での追加的なエネルギー投入が重要であると言える。

5.7. まとめ

ABLE 炉心の再臨界回避に対する有効性を評価し、下記に示す結論を得た。

- ◆ ABLE 炉心及び UAB 付き ABLE 炉心は、通常炉心の場合と比較して、炉心領域からの燃料排出を促進し、エナジェティックな再臨界を回避出来る可能性がある。
- ◆ ABLE 炉心における、再臨界回避の可否は、燃料可動性を支配する燃料エンタルピーに大きく依存する。
- ◆ すなわち、燃料エンタルピーがリキダス相当まで上昇する場合には、軸ブランケット燃料削除部分から、燃料は先行的に排出され、限界プール未満で炉心領域から全炉心の 3 割の燃料を排出可能。ABLE は有効に機能する。
- ◆ しかし、燃料エンタルピーがソリダス以下の場合には、燃料は、ピン束に詰まりながら徐々に流出する。限界プール未満で炉心領域から有効な燃料量を排出することは困難。(解析結果では、有意なバーストは発生していないが、FCI の不確しさを、被覆管溶融侵食による低エンタルピー燃料の流出モードの実際性などに、検討事項が残されている)
- ◆ 低エンタルピーシナリオの場合に、燃料排出が困難である点は、FAIDUS 炉心でも同様である。
- ◆ ABLE 炉心の場合には、炉心から排出された燃料は、炉心領域近傍に堆積し、中長期の PAMR 仮定に移行する。
- ◆ ABLE を有効に機能させるためには、遷移過程初期の追加的なエネルギー投入が不可

欠である。ノミナルケースの評価結果では、約 7FPS 以上が必要である。

高エンタルピーシナリオでは、ABLE は再臨界回避方策として、有効に機能することが明らかになった。一方、低エンタルピーシナリオでは、燃料流出挙動、燃料プール挙動など不確かさが大きく、炉心設計までを含めた詳細な検討と最終的には実験による確認が必要である。

6. 結論

ABLE 炉心の再臨界回避に対する有効性を評価し、下記に示す結論を得た。

- ABLE 炉心及び UAB 付き ABLE 炉心は、通常炉心の場合と比較して、炉心領域からの燃料排出を促進し、エナジェティックな再臨界を回避出来る可能性がある。
- ABLE 炉心における、再臨界回避の可否は、燃料可動性を支配する燃料エンタルピーに大きく依存する。
- すなわち、燃料エンタルピーがリキダス相当まで上昇する場合には、軸ブランケット燃料削除部分から、燃料は先行的に排出され、ABLE は有効に機能する。
- しかし、燃料エンタルピーがソリダス以下の場合には、燃料は、ピン束に詰まりながら徐々に流出する。限界プール未満で炉心領域から有効な燃料量を排出することは困難。
- ABLE 炉心の場合には、炉心から排出された燃料は、炉心領域近傍に堆積し、中長期の PAMR 仮定に移行する。
- ABLE を有効に機能させるためには、遷移過程初期の追加的なエネルギー投入が不可欠である。ノミナルケースの評価結果では、約 7FPS 以上が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、技術のご指導及び有益なご助言を賜りました平成13年度ナトリウム炉安全WGの下記の皆さまに深く感謝の意を表します。

安全設計Gr. 丹羽元グループリーダー、久保重信氏、リスクGr. 佐藤一憲グループリーダー、遠藤寛氏、FBRGr. 島川氏、笠井氏、三菱重工小山和也氏、東芝松宮壽人氏。

また、解析業務全般に渡り、多大に助成下さいました原子力システム(株)菅谷正昭氏に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] H.Niwa,et al., “FUTURE NEEDS ON THE IN-PILE SAFETY EXPERIMENTS FOR THE COMMERCIALIZATION OF FBRs”, Global Environment & Nuclear Energy Systems, 371 (1994).
- [2] 飛田吉春、守田幸路、他、「高速増殖原型炉 ULOF 事象の評価研究 —最新の知見を反映した炉心損傷評価—」、JNC TN9410 97-079、1997 年 9 月。
- [3] H.Endo et al., “SAFETY FEATURES OF SELF-CONSISTENT NUCLEAR ENERGY”, Global Environment & Nuclear Energy Systems, 463 (1994).
- [4] 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、2000 年 4 月。
- [5] 小野田雄一、佐藤一憲、「CABRI-FAST EFM1 試験における破損後燃料移動挙動」、サイクル機構技報 No.7、p71~81、JNC TN1340 2000-002.
- [6] 有江和夫、遠藤 寛、他、“燃料損傷時の安全性向上を目指した大型 MOX 高速炉炉心外年の検討 (1)炉心概念”、日本原子力学会 1999 年秋の大会予稿集、G35 (1999).
- [7] 遠藤 寛、有江和夫、他、“燃料損傷時の安全性向上を目指した大型 MOX 高速炉炉心外年の検討 (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).
- [8] D.Struwe, H. Niwa, et al., “Overview on Material Relocation Phenomena in Liquid Metal Fast Reactors as Consequence of Core Disruption” IWGFR/89 (1994).
- [9] 藤田朋子、飛田吉春、「SIMMER-III による CABRI-FAST EFM1 試験解析」、JNC TN9400 2001-100、2001 年 11 月。
- [10] 飛田吉春、藤田朋子、他、「SAS4A/SIMMER-III 接続コード SAME-II の開発」、JNC TN9400 2002-018、2002 年 3 月。

表 1 評価対象炉心の緒元

項目	単位	値
炉心燃料		中空 MOX ペレット燃料
炉心高さ	mm	1000
上/下軸ブランケット長	mm	400/400
ガスプレナム長	mm	100/840
集合体あたりのピン本数	本	331
ピン外径/内径	mm	8.8/7.6
被覆管肉厚	mm	0.6
ペレットスミア密度	%TD	82
ワイヤ径	mm	1.34
ピン配列ピッチ	mm	10.2
ワイヤ巻きピッチ	mm	200
集合体配列ピッチ	mm	201
ダクト外対面間距離	mm	198
ダクト内対面間距離	mm	188
ダクト肉厚	mm	5
炉心燃料集合体数	体	408
ABLE ピン内蔵本数	本	37
炉心等価径	m	4.9
最大ボイド反応度*	\$	5.8

*内部ブランケット燃料集合体の沸騰を考慮

表 2 ABLE 炉心の静的反応度変化解析結果

ケース	keff	反応度 (\$)
基準	0.99748	-
ケース A1	0.97036	-9.3
ケース A2	0.91898	-28.3
ケース A3	0.92046	-27.8
ケース A4	0.99984	+0.8
ケース A5	1.00791	+3.4

 $\beta_{\text{eff}}=3.02\text{E-}03$

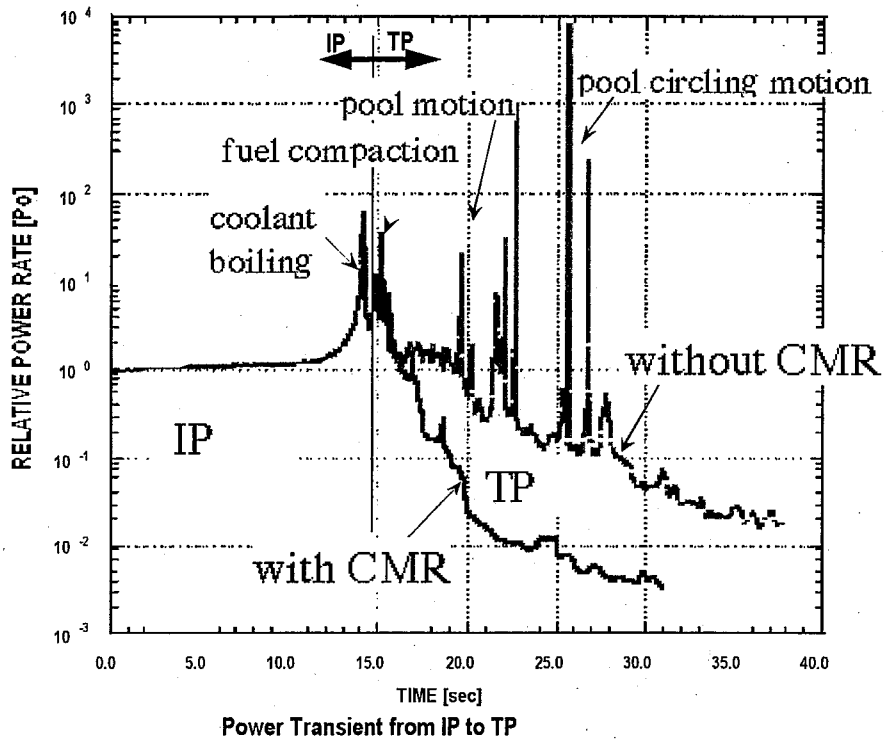


図 1 CMR による再臨界回避

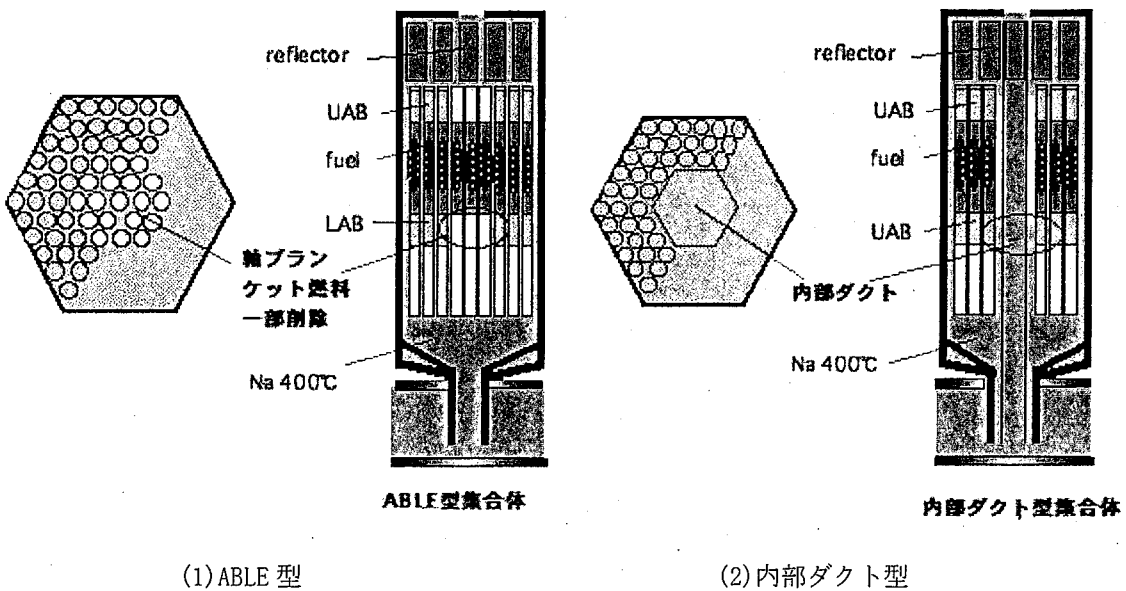
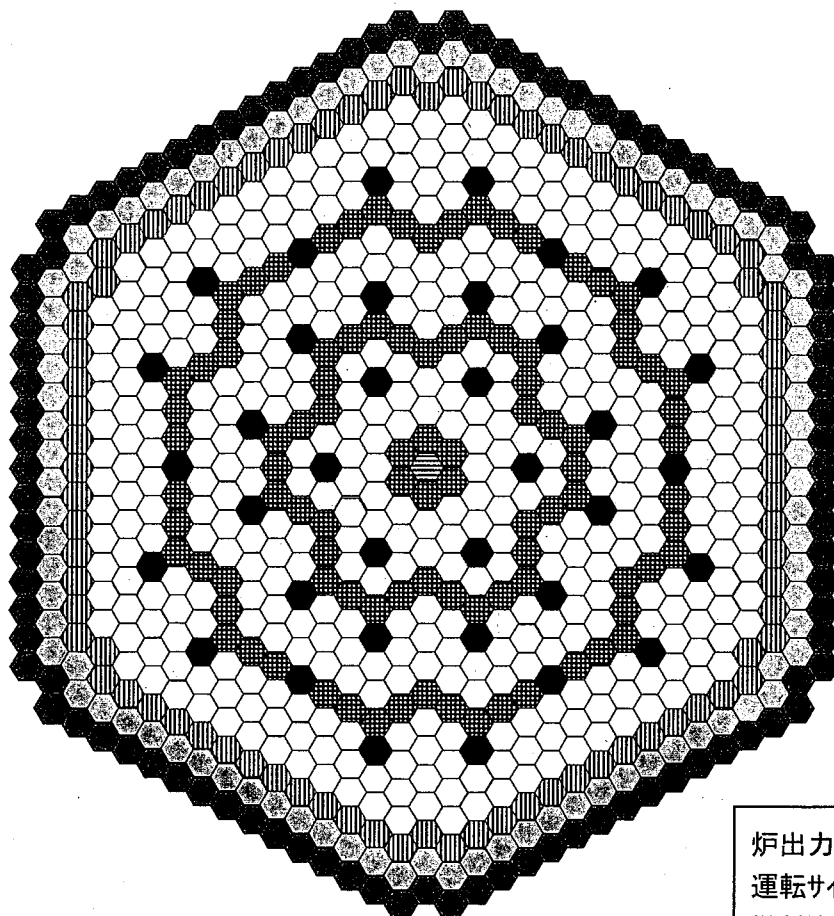


図 2 再臨界回避方策



炉出力 : 3,570MWt
 運転サイクル長: 19ヶ月
 燃料交換バッチ数
 炉心燃料 : 4バッチ
 内部ブランケット: 2バッチ
 径ブランケット : 4バッチ

○	炉心燃料集合体	408体
⊗	内部ブランケット	96体
⊕	径方向ブランケット	84体
≡	SUS集合体	1体
⊙	SUS遮蔽体	90体
●	B ₄ C遮蔽体 (暫定)	96体
●	制御棒	36体
合 計		811体

図 3 炉心集合体配置図

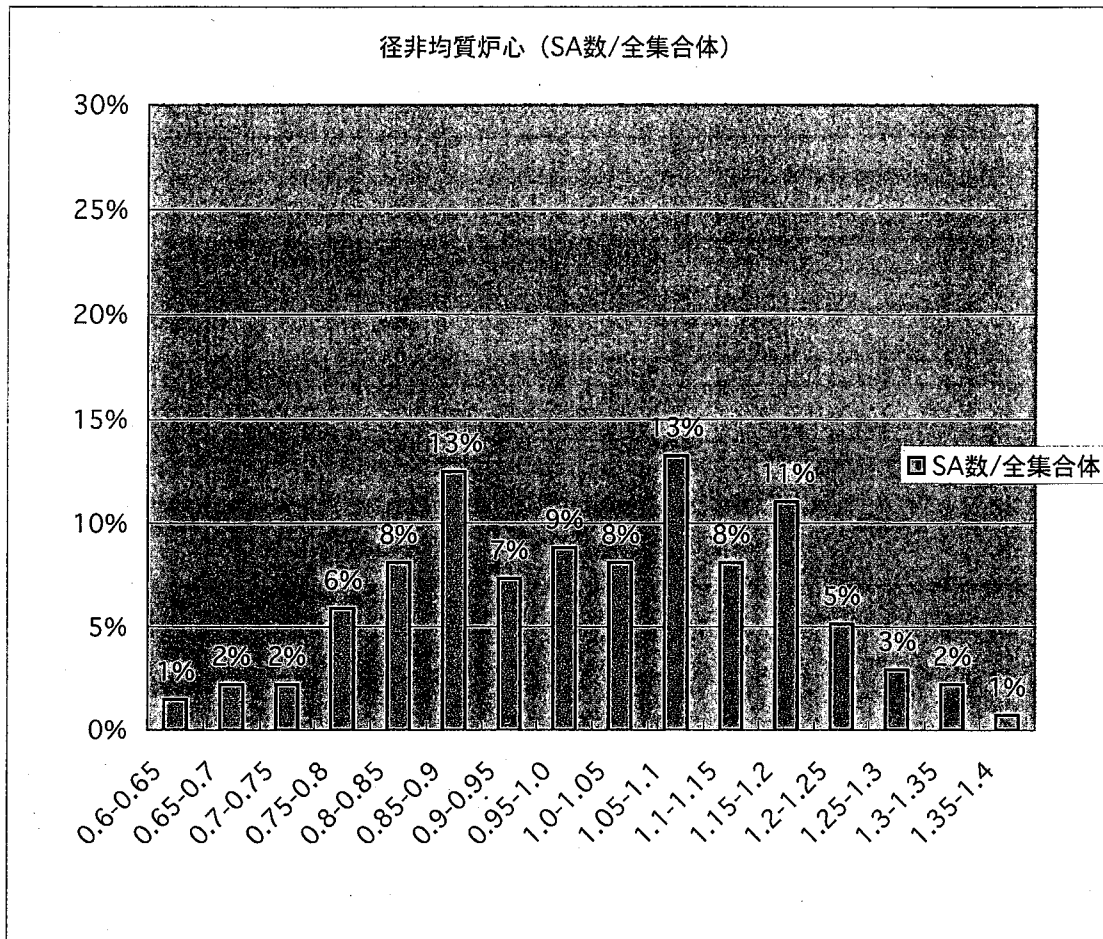


図 4 径方向非均質炉心の P/F 値分布

軸方向 領域長 [m]	軸メッシュ 長 [m]	メッシュ 数 []	ピン本数→ i / j	7 1	30 2	54 3	180 4	60 5	6 6	
1.7	1.7000	1	77	(22) cover gas						
			76	(21) Na pool						
6.1	2.0330	3	74							
0.22	0.2200	1	73	(20) H/H						
			72							
0.67	0.2233	3	70	(18) B4G			(19) B4G			
			69	(16) Na.C2						(17) Na
0.2	0.1000	1	68							
0.02	0.0200	1	67	(30) TPS			(31) TPS			
			66							
0.1	0.0333	3	64	(13) UGP			(14) UGP	(15) UGP		
			63							
0.4	0.0800	5	59				(11) UAB	(12) UAB		
			58							
1.0	0.1000	10	49			(9) CORE		(10) CORE	(23) dm	
			48							
0.03	0.0300	1	47	(27) TPS						
			46							
0.37	0.0308	12	36				(7) LAB	(8) LAB		
			35							
0.03	0.0300	1	34	(28) TPS						
			33							
0.84	0.0311	27	8	(4) LGP			(5) LGP	(6) LGP		
			7							
0.04	0.0400	1	6	(26) BPS						
			5							
0.33	0.1100	3	4			(2) L. Ref		(3) L. Ref		
			3							
2	0.6667	3	2	(1) HPP						
			1							

図 5 解析体系図

	whole core		1/3 core	
	TOTAL		TOTAL	
Fuel assemblies (1)	54		18	
Fuel assemblies (2)	132		44	
Fuel assemblies (3)	222	408	74	136
Inner blanket assemblies (1)	6		2	
Inner blanket assemblies (2)	36		12	
Inner blanket assemblies (3)	54	96	18	32
Radial blanket assemblies	84	84	28	28
		588		196

RHC (H12) EOC core

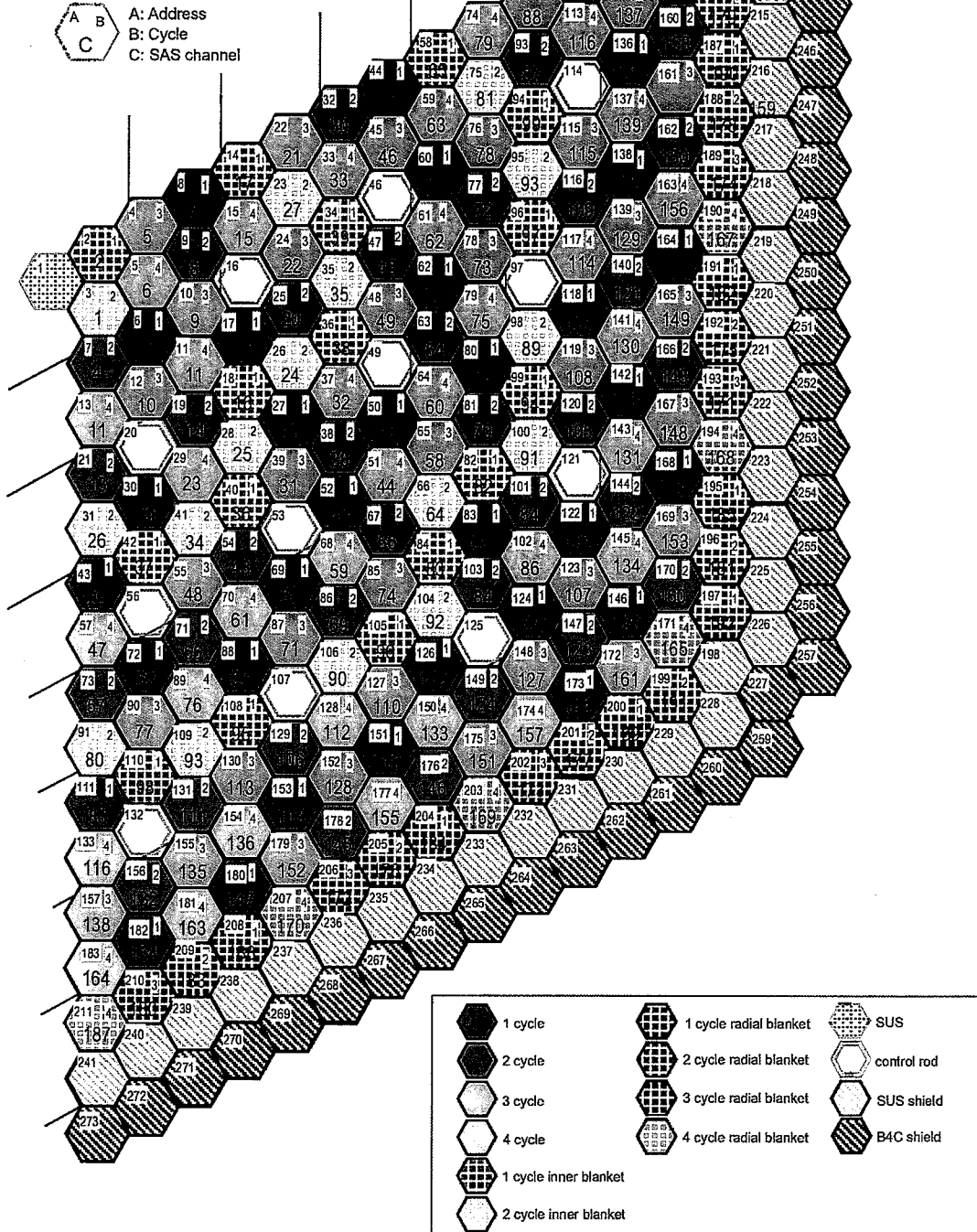


図 6 SAS4A チャンネル配置図

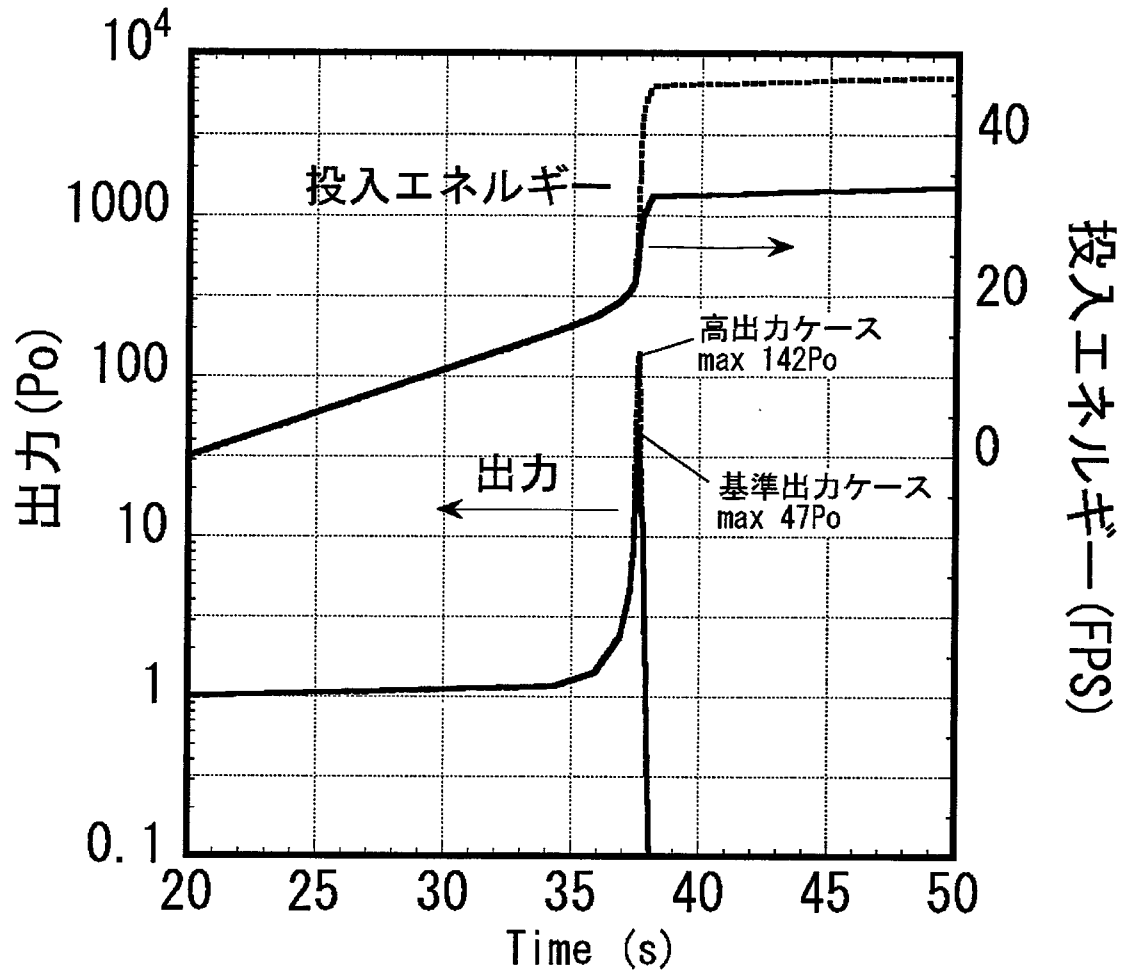


図 7 SAS4A 解析結果による出力履歴

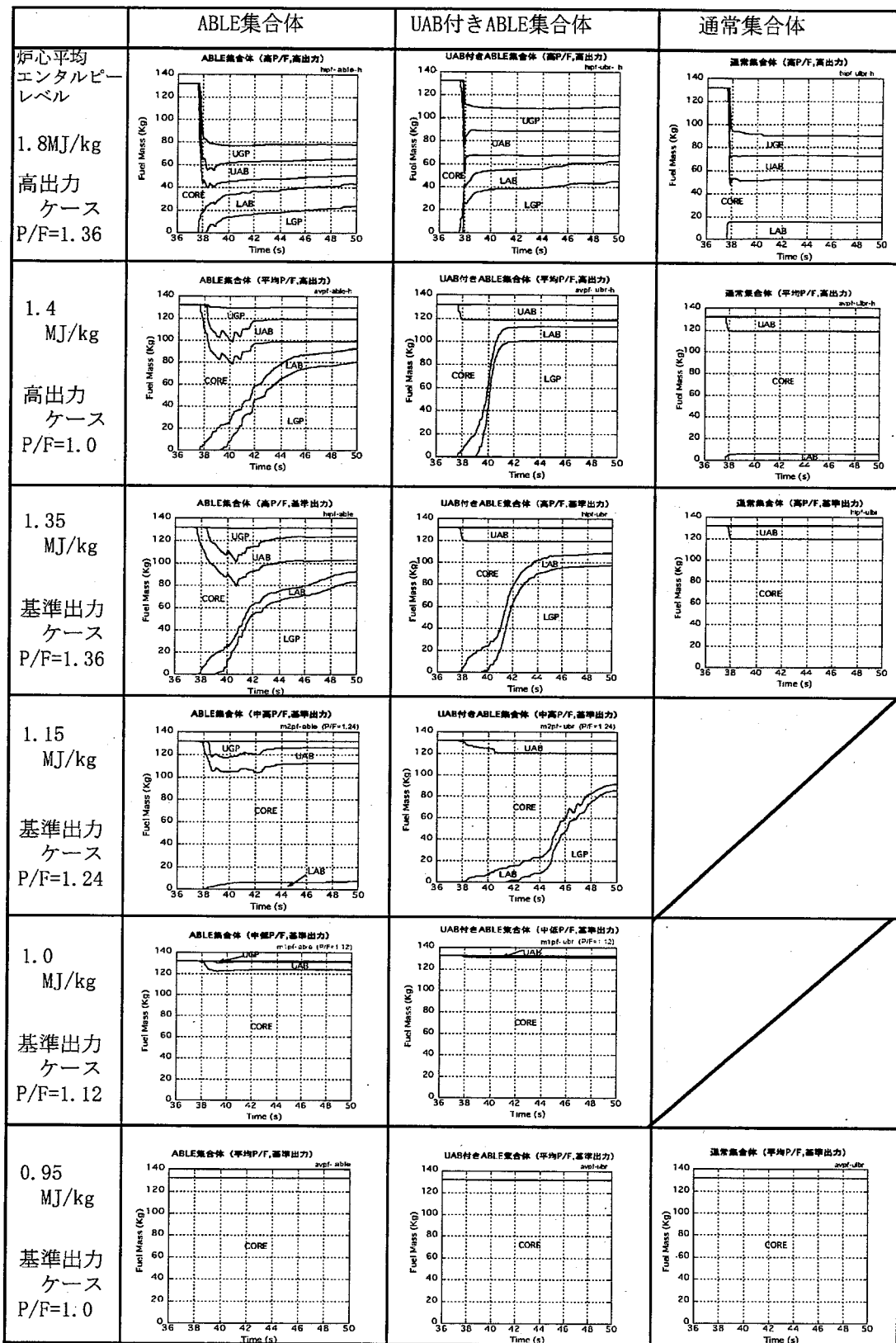


図 8 各集合体の燃料流出挙動

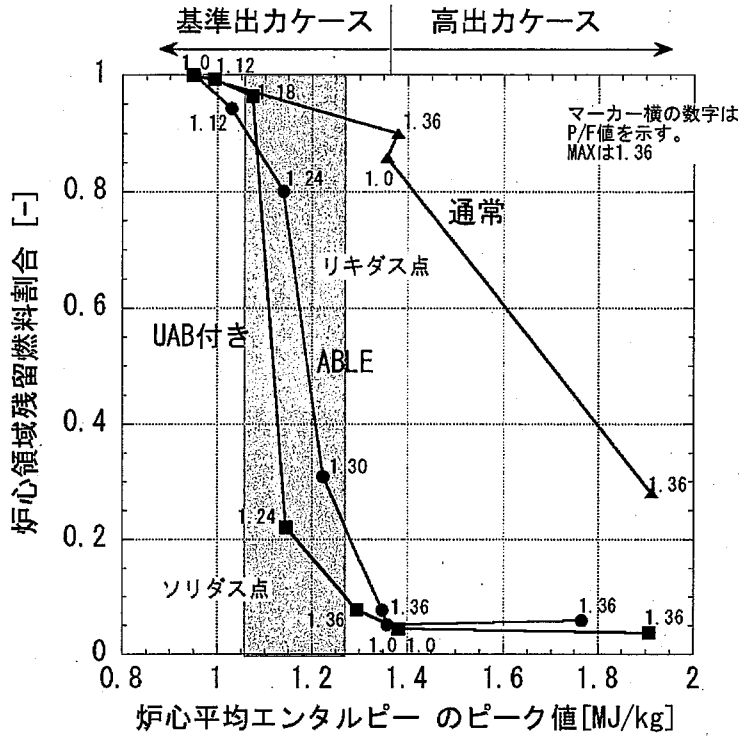
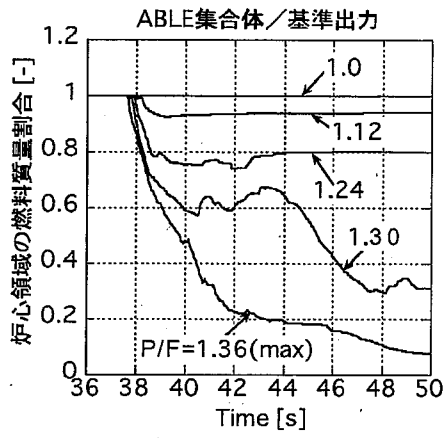
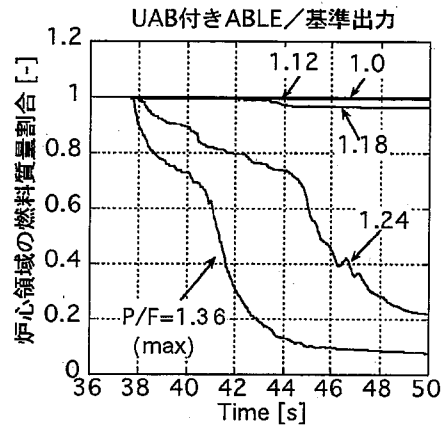


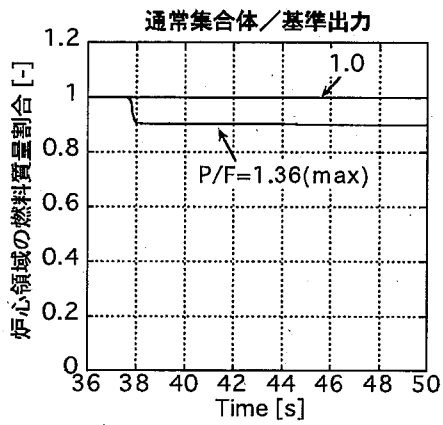
図 9 燃料流出マップ



(1) ABL集合体



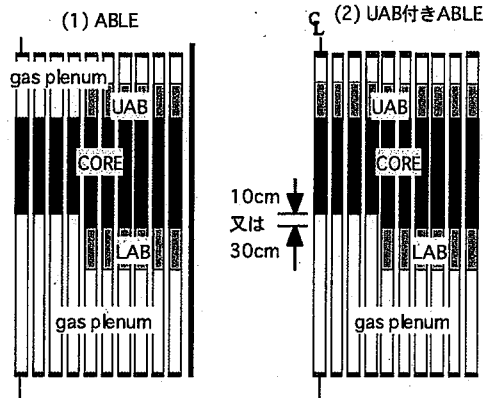
(2) UAB付き ABL集合体



(3) 通常集合体

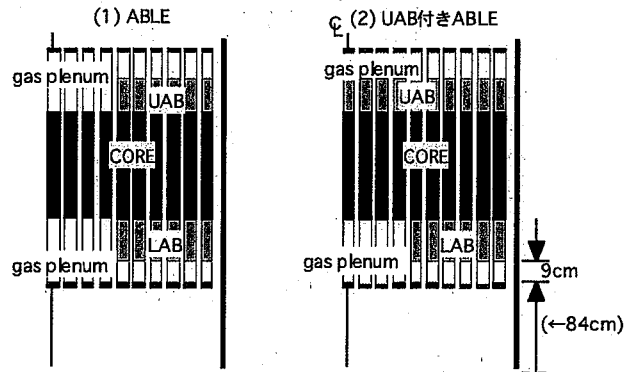
図 10 炉心燃料領域に残留する燃料量の推移

ABLEピン炉心燃料の下端を削除



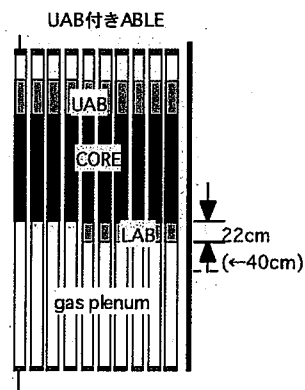
(1) 炉心燃料の下端を削除

下部ガスプレナム領域短尺化



(2) 下部ガスプレナム領域の短尺化

通常ピンLABを短尺化



(3) 通常ピン束のLABを短尺化

図 11 再臨界回避方策の改良案

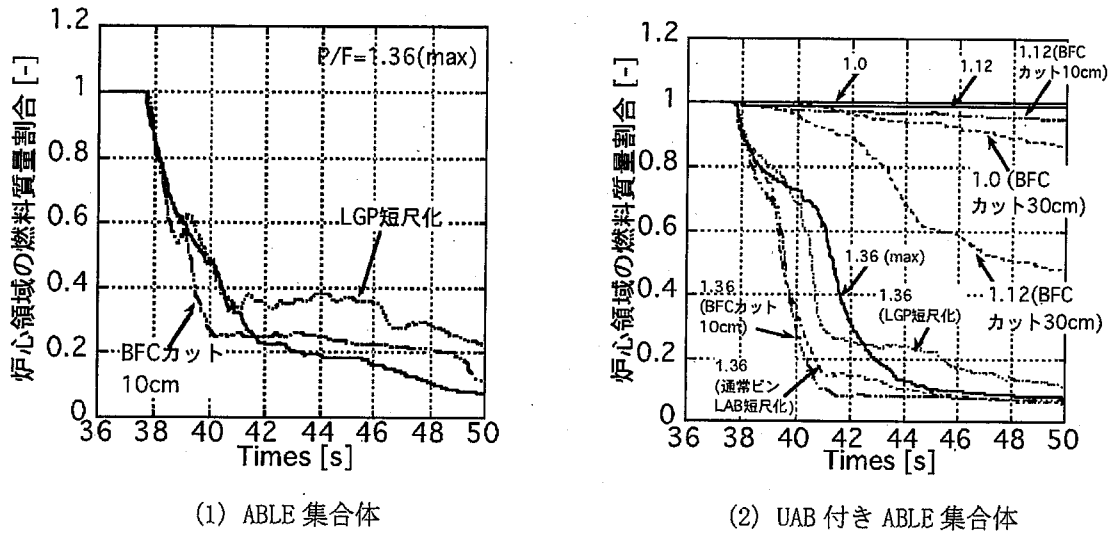


図 12 再臨界回避方策の評価結果

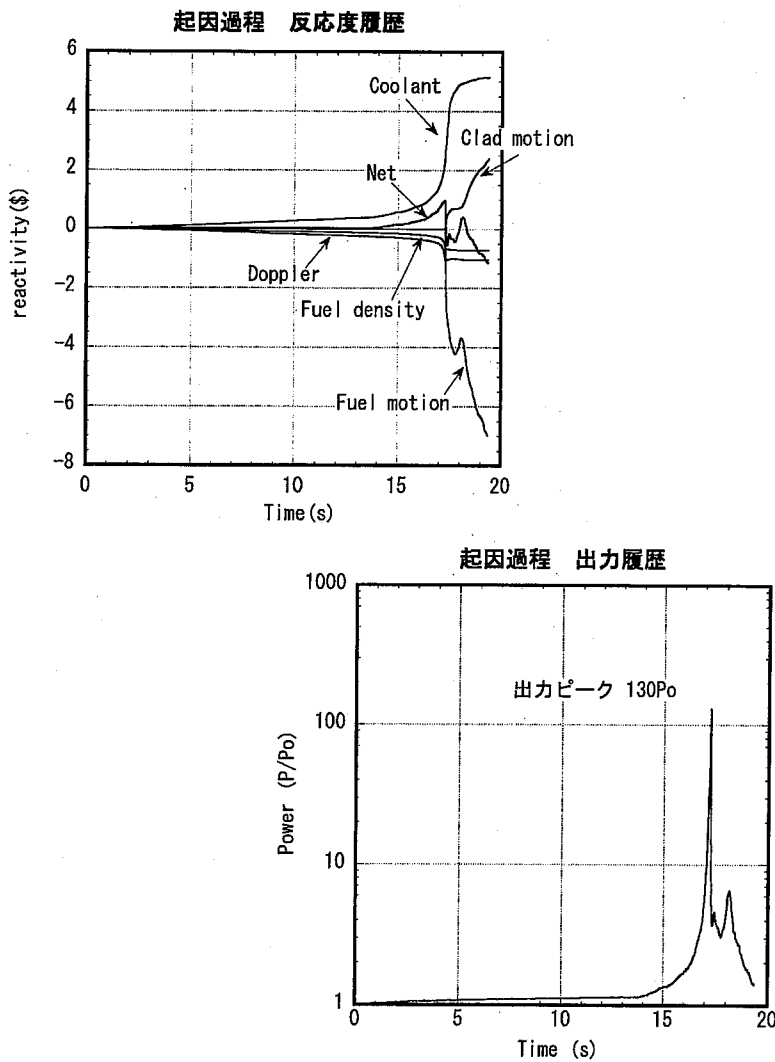


図 13 起因過程の反応度・出力履歴

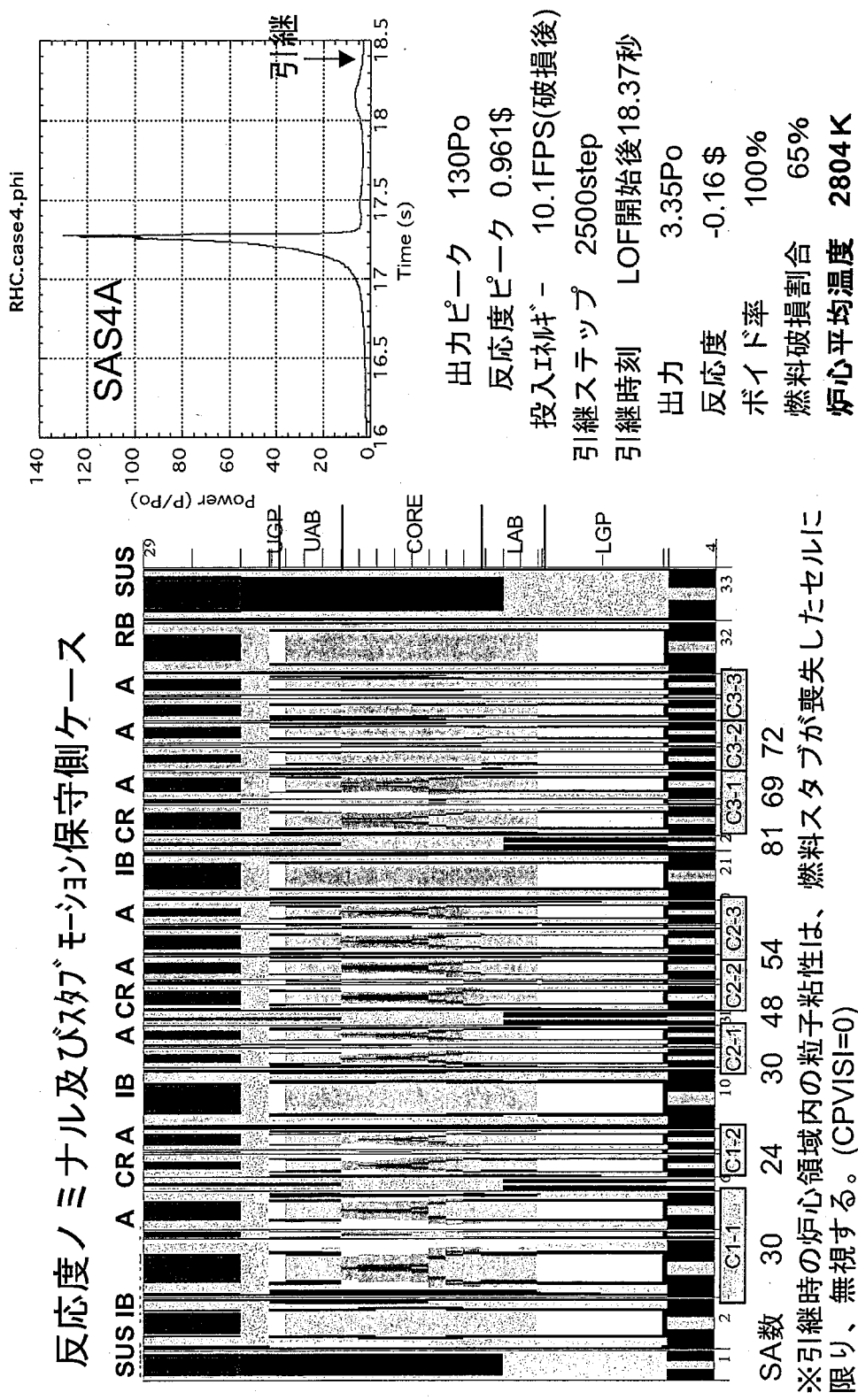


図 14 引継時の炉心状態

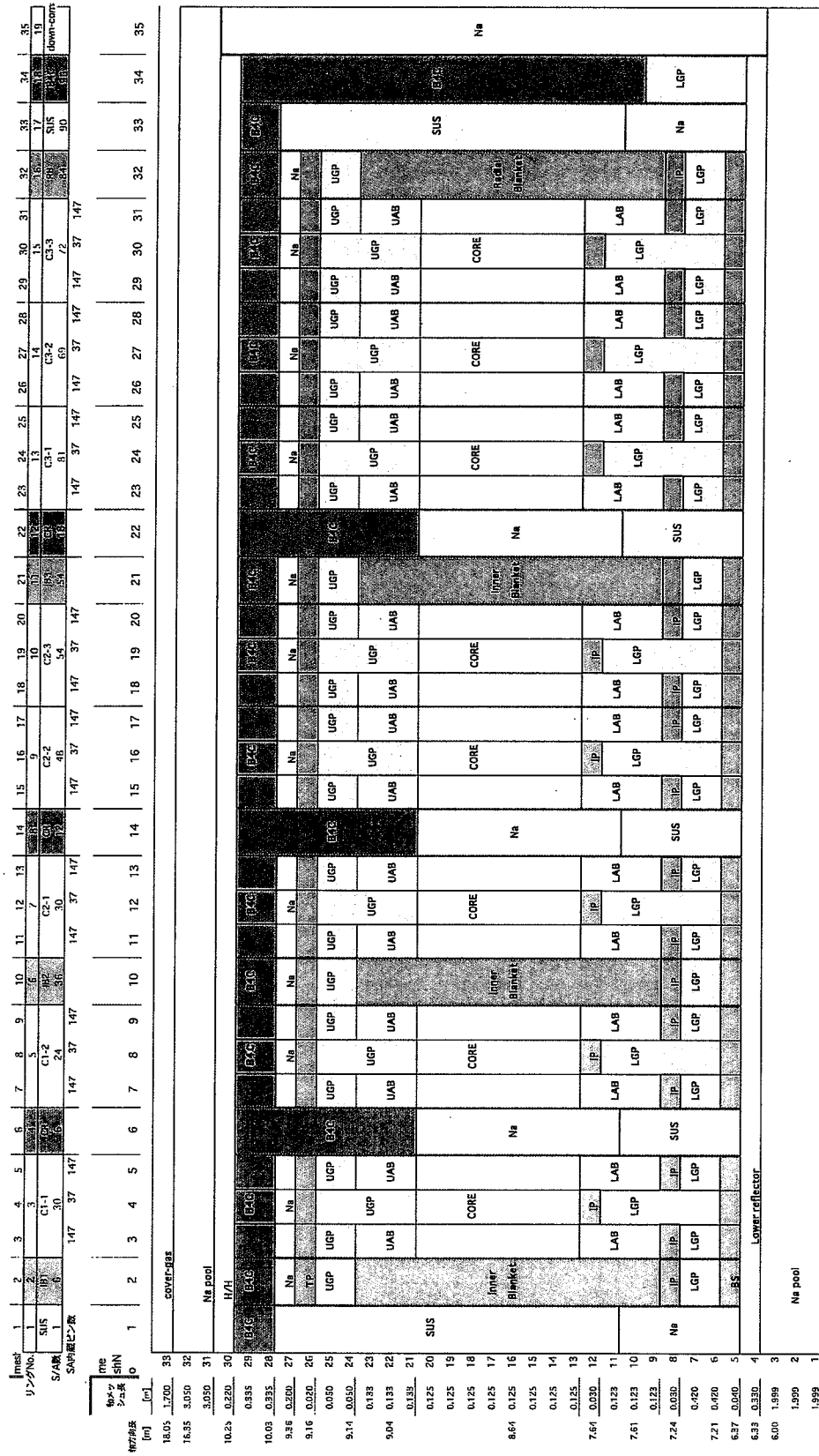
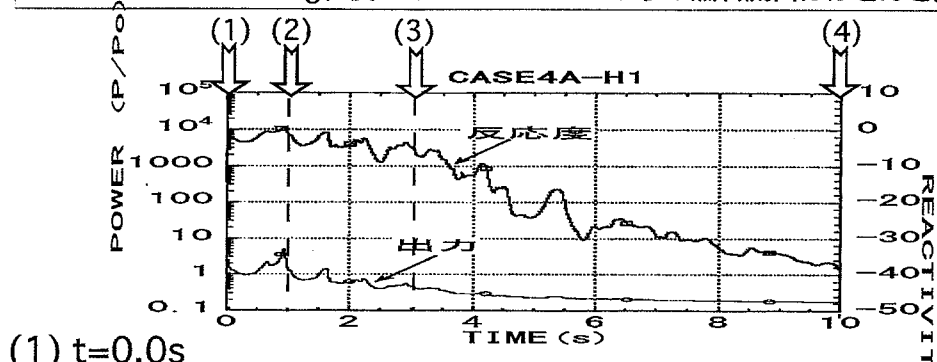


図 15 SIMMER-III 解析体系図

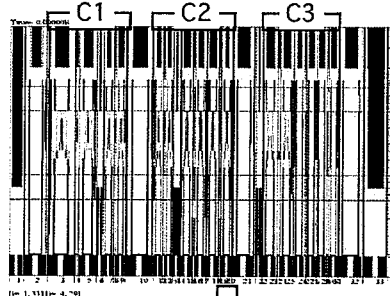
ABLE炉心シナリオ

ABLE炉心の特徴

1. 燃料の早期排出によって、初期の燃料落下に起因するバーストを緩和
2. 炉心燃料の1/3は一旦上方へ分散し、ピン上端部に堆積する。分散燃料の落下による反応度印加を回避。反応度は順次低下。
3. ピン上部又は上部ピン束間に堆積した燃料は、UAB崩壊時にUABを内包した状態で、炉心領域に落下すると推測される。全炉心で同時に落下が発生する場合、即発臨界に至る可能性がある。（静的核計算の結果から）
4. CRGT壁破損時には、炉心領域内圧力が上昇するが、CRGT周囲の燃料エンタルピーは0.86MJ/kg程度であるため、CRGTからの燃料流出はほとんど無い。



(1) t=0.0s

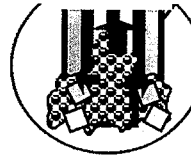


燃料はほとんど粒子状態。
 炉心領域内の下側には、未破損燃料ペレットが残存。
 反応度 -0.16\$
 出力 3.35Po
 炉心燃料平均温度 2804K

(2) t=1.0s

ABLE効果

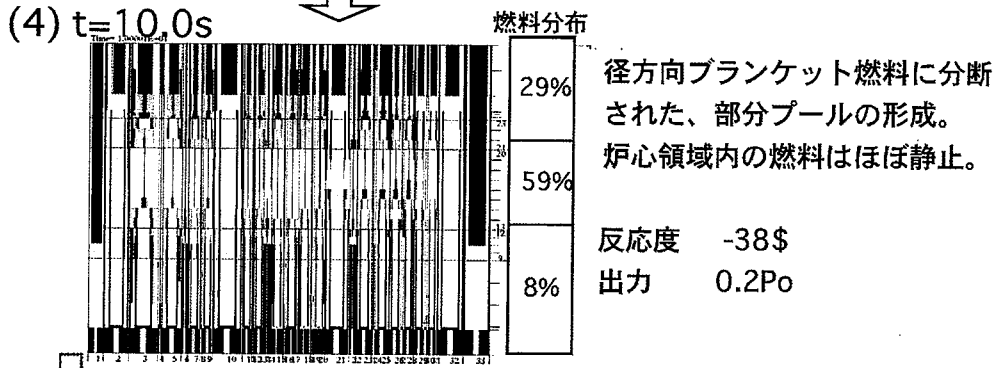
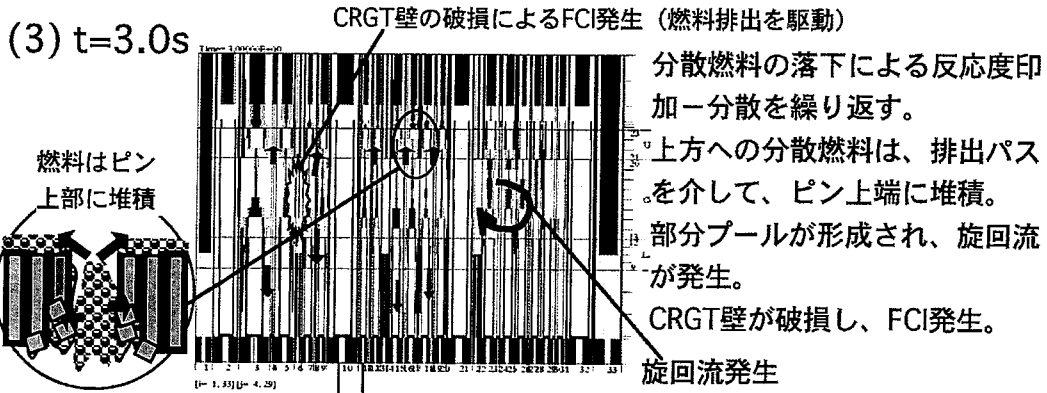
- 排出バス(軸ブラ削除部)形成
- 隣接する被覆管に付着し、溶融
- ブランケットの崩壊



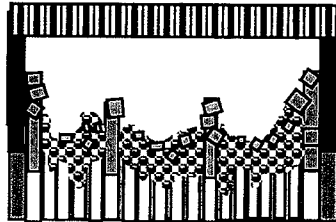
ラップ管壁破損→径方向運動開始

上方に分散した燃料が落下。
 落下した燃料は、下部未破損燃料破損時の生じるFPガス圧に駆動されて再び上方へ分散。
 燃料排出バス(軸ブラ削除部)形成。
 ラップ管壁が溶融し、燃料の径方向運動が開始する。

図 16 ABLE 炉心シナリオのまとめ



10秒以降の事象推移予測



ラッパ管壁はほぼ溶融し、UABも崩壊する。ピン上端に堆積した燃料は、UAB崩壊とともに落下する。長期的なPAMR過程へ移行。但し、UABを内包した燃料の同時落下については、静的核計算の結果から、再臨界性を否定できない。

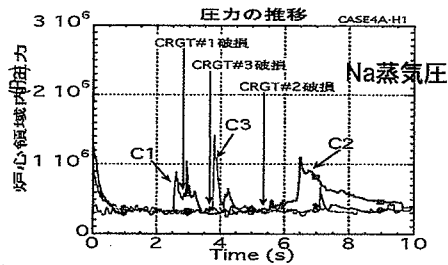
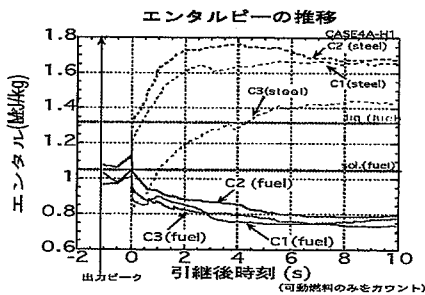
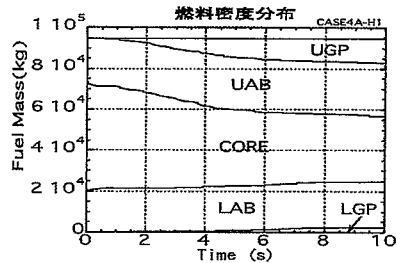
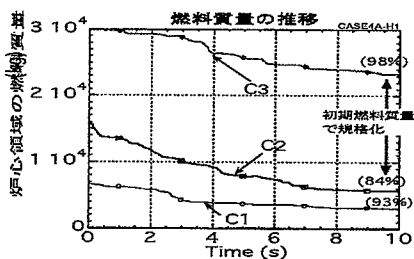
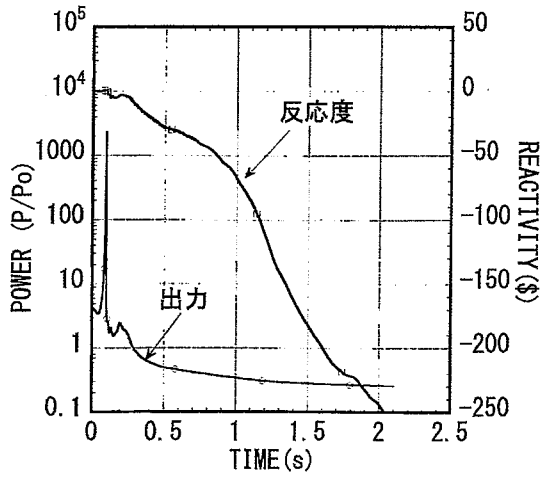
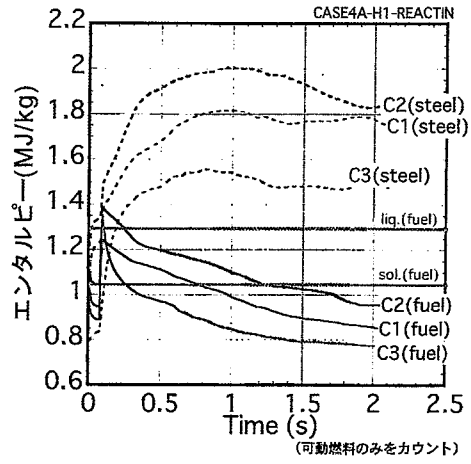


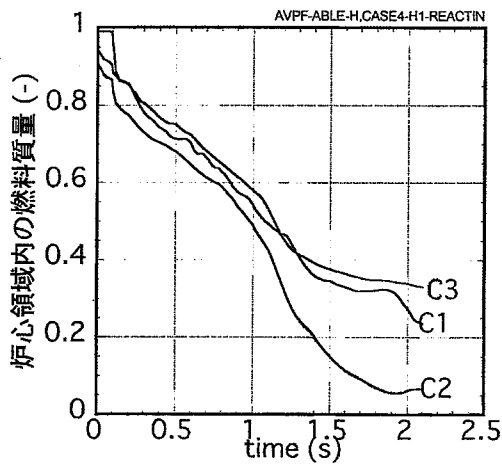
図 16 ABLE 炉心シナリオのまとめ (2)



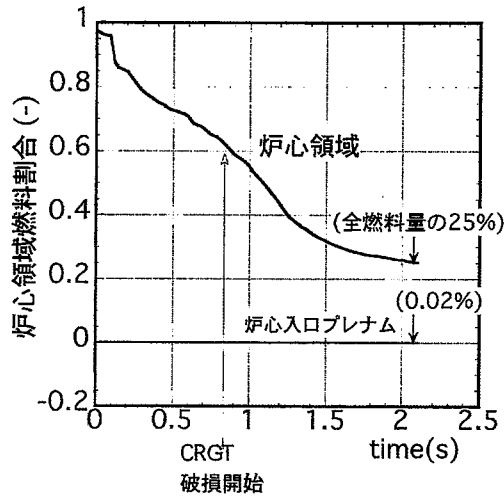
(1) 出力・反応度履歴



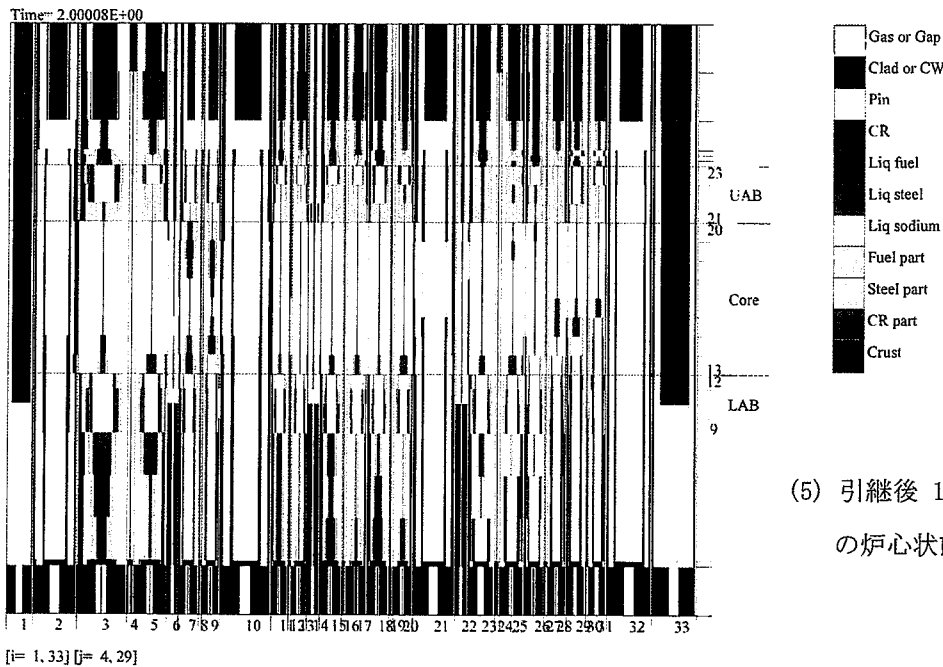
(2) 燃料エンタルピーの推移
(可動燃料のみをカウント)



(3) C1, C2, C3 領域の燃料質量

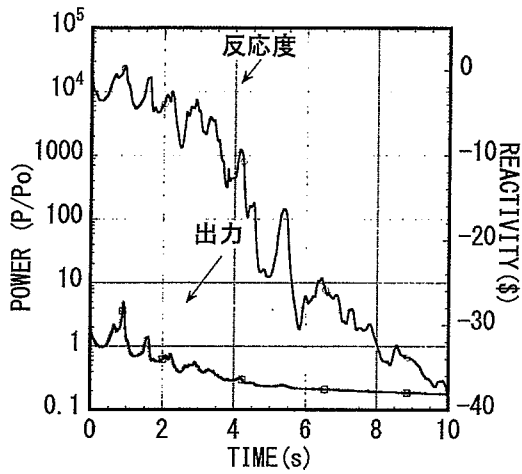


(4) 炉心領域と炉心入口プレナム内の燃料量

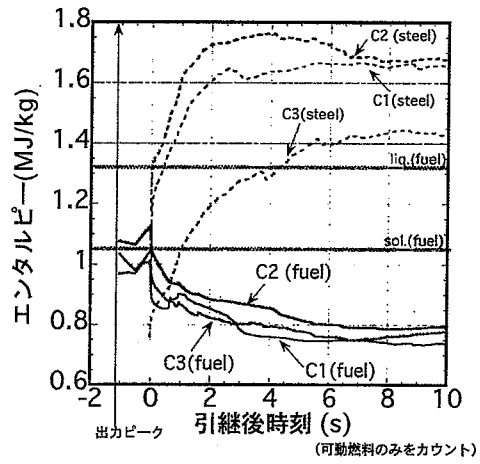


(5) 引継後 1.2 秒
の炉心状態

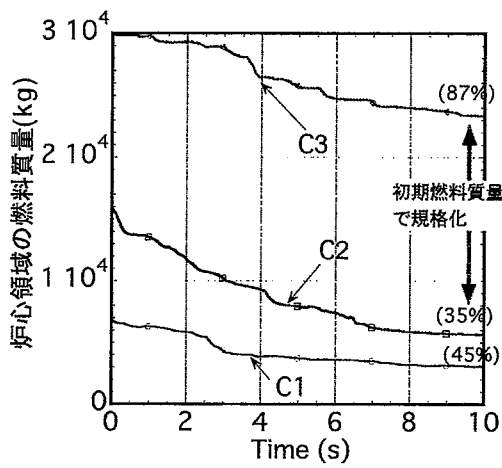
図 17 高エンタルピーシナリオのまとめ



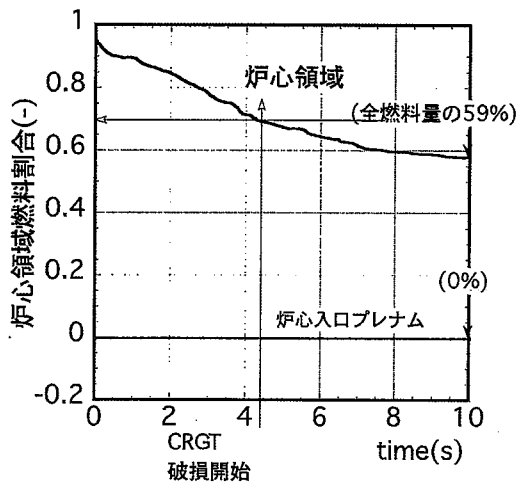
(1) 出力・反応度履歴



(2) 燃料エンタルピーの推移



(3) C1, C2, C3 領域の燃料質量



(4) 炉心領域と炉心入口プレナム内の燃料量

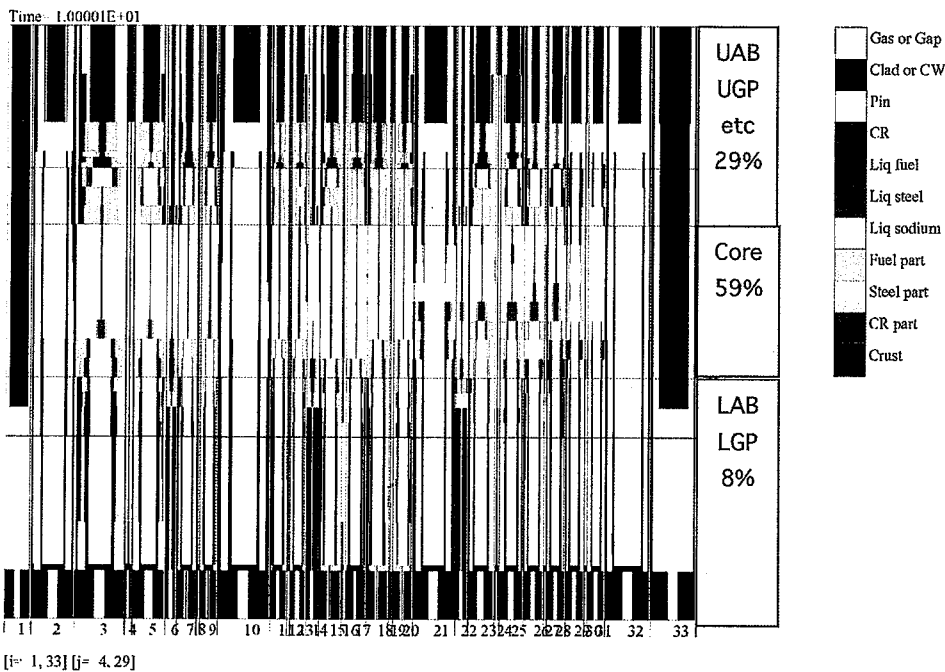


図 18 低エンタルピーシナリオのまとめ

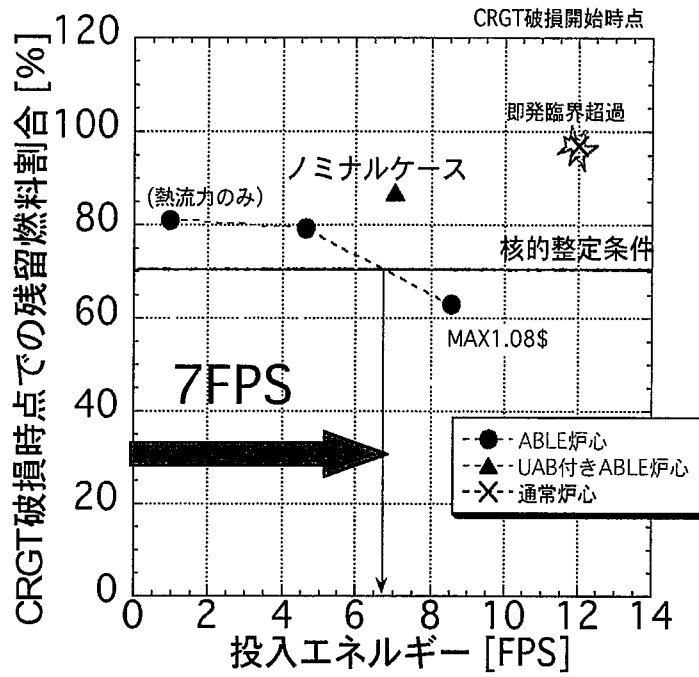
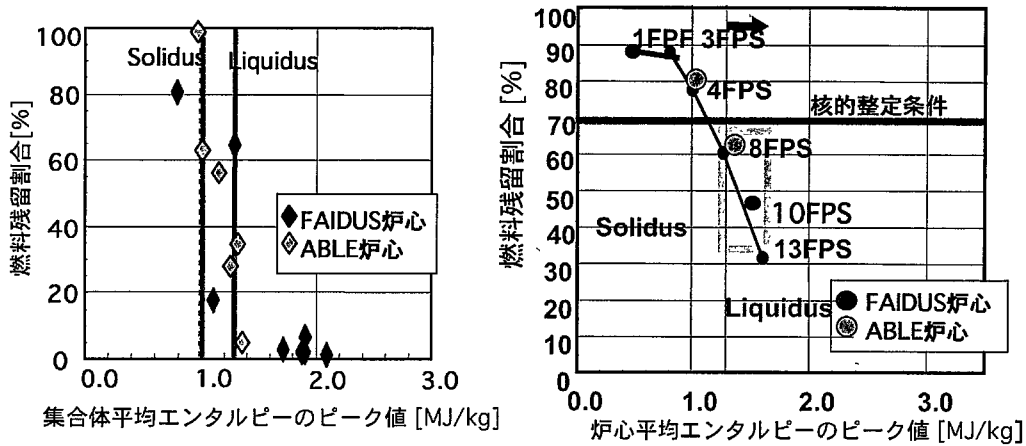


図 19 投入エネルギーと残留燃料割合の相関マップ

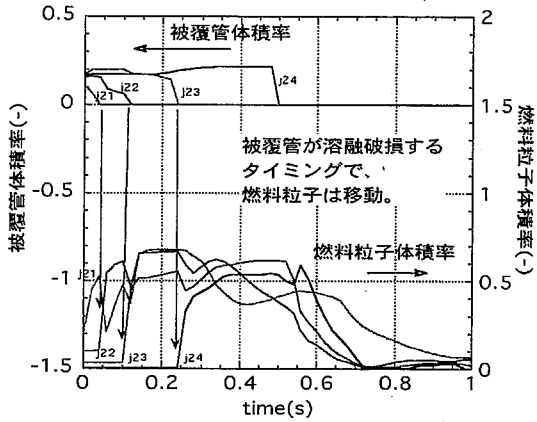


(1) 集合体毎エンタルピーと燃料残留割合の関係

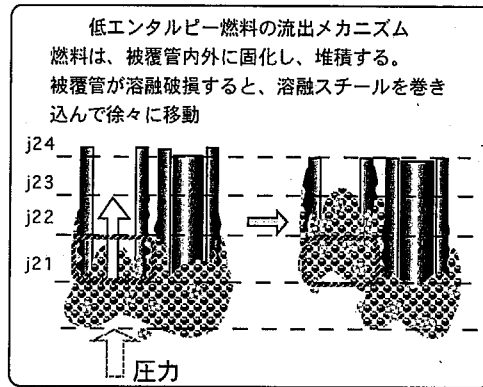
(2) 炉心投入エネルギーと燃料残留割合の関係

図 20 FAIDUS 炉心との比較

低エンタルピー燃料の流出挙動の調査
(CASE4A-H1, C2-2 ABLEピン)

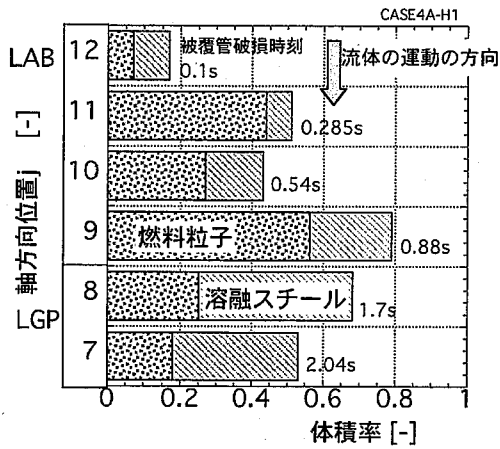


(1) ABLEピン被覆管及び燃料粒子体積率の推移



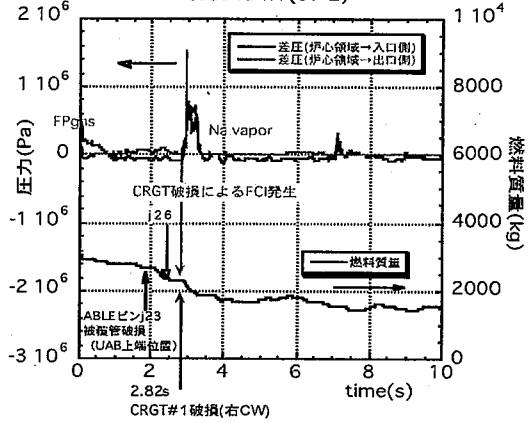
(2) 低エンタルピー燃料の流出メカニズム

ABLEピンの被覆管破損時の成分体積率



(3) ABLEピン被覆管破損時の成分体積率

CRGT破損時の燃料排出への影響
case4a-h1(c1-2)



(4) 駆動圧

図 21 低エンタルピー燃料の流出メカニズムの調査

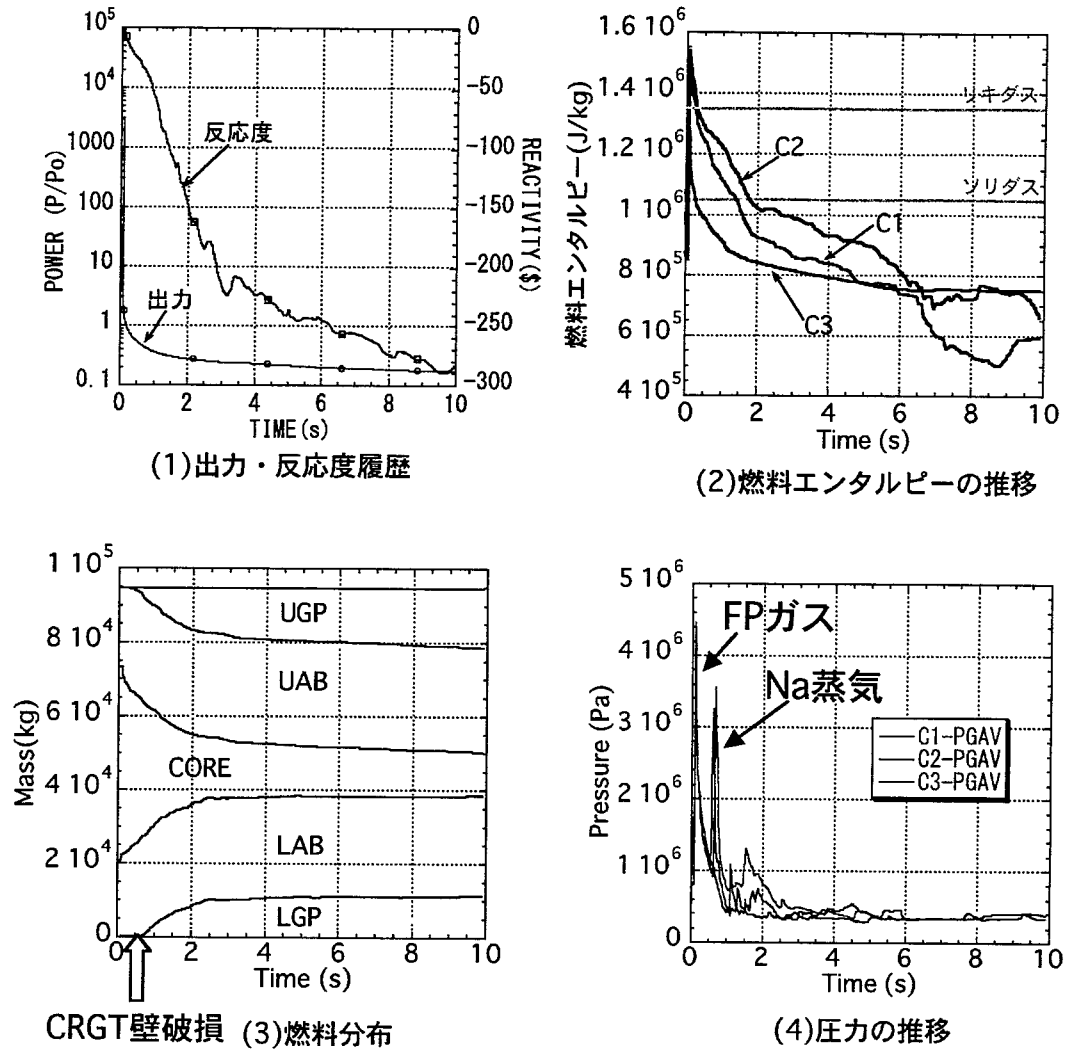


図 22 燃料の初期侵入抑制の効果

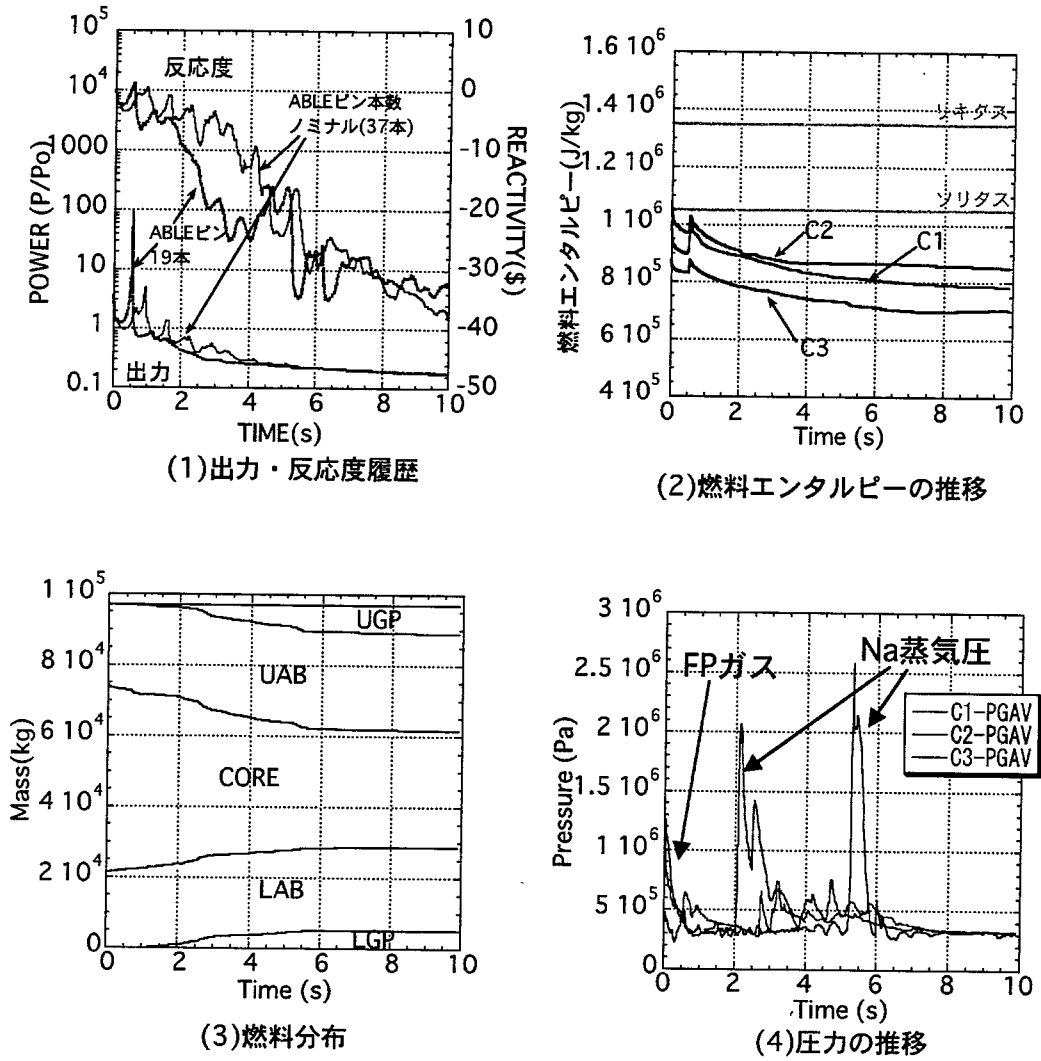


図 23 ABL ピン束本数低減の効果

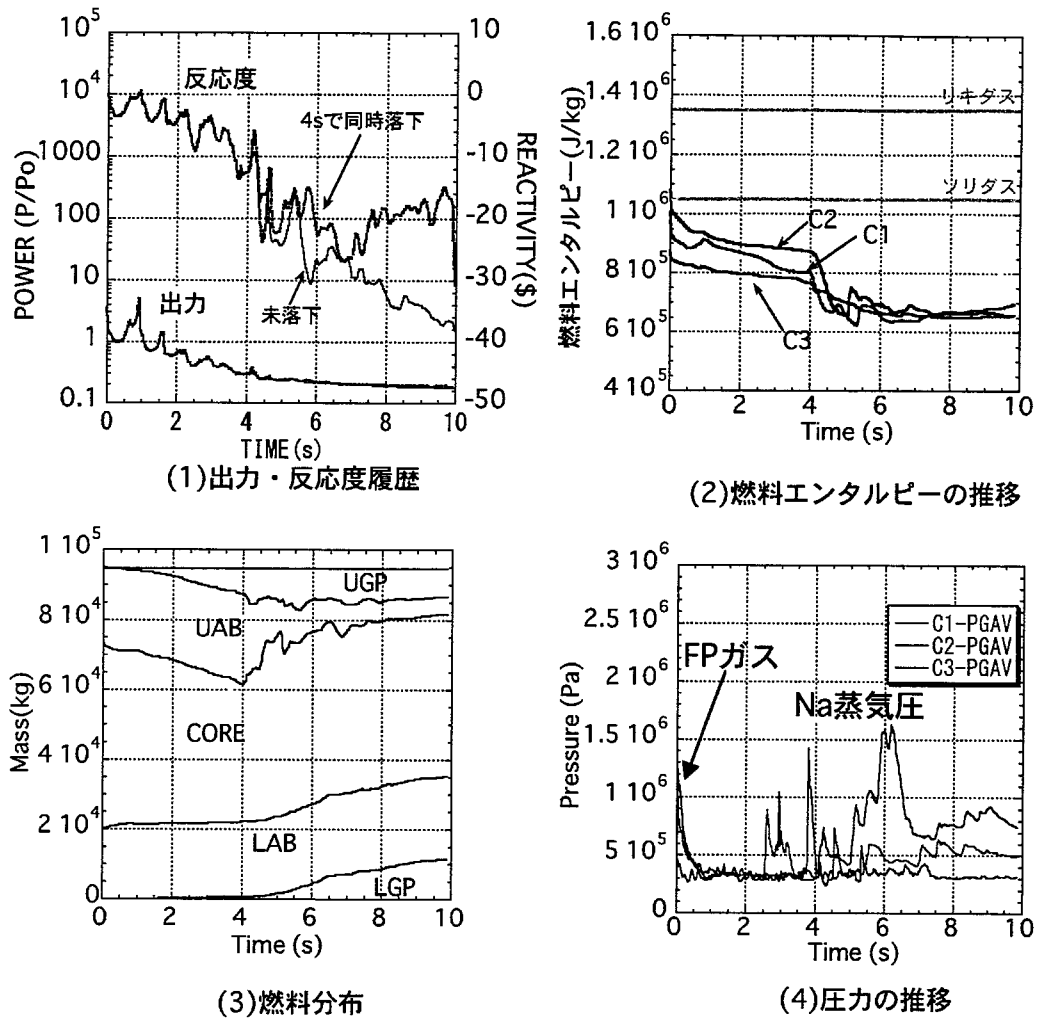


図 24 燃料の同時落下によるコンパクション効果

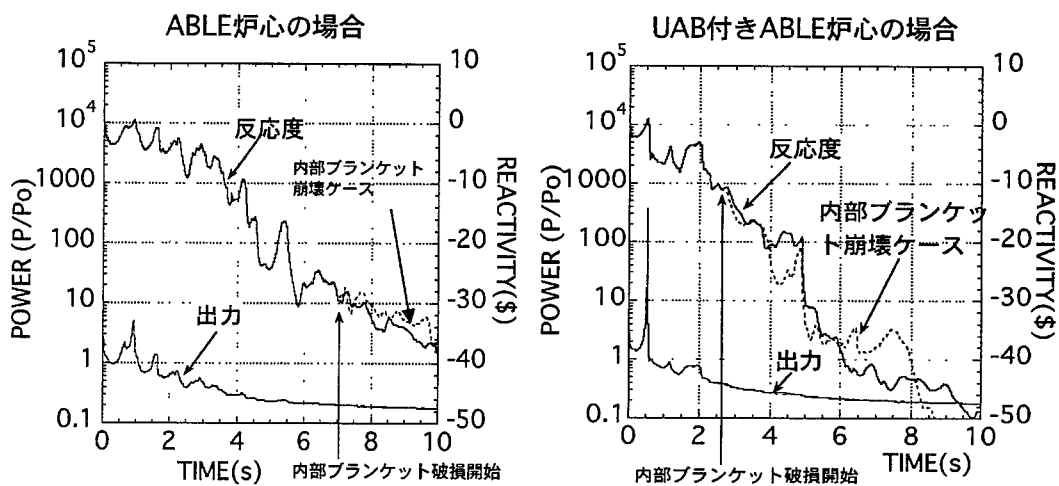
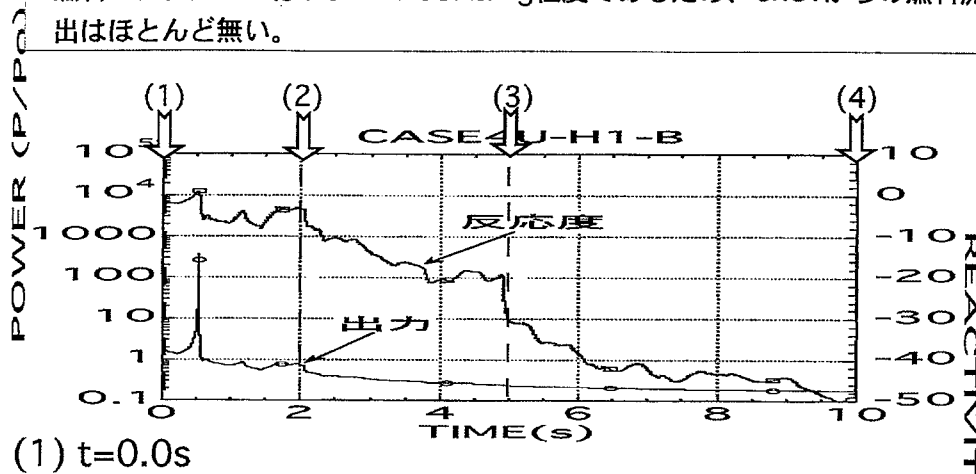


図 25 内部ブランケット燃料の崩壊の影響

UAB付きABLE炉心シナリオ

UAB付きABLE炉心の特徴

1. 燃料の早期排出によって、初期の燃料落下に起因するバーストを緩和
2. 熔融炉心燃料のほとんどは下部ガスプレナム部に堆積する。分散燃料の落下による反応度印加を回避。反応度は順次低下。
3. CRGT壁破損時のFCI発生により炉心領域内圧力が上昇するが、CRGT周囲の燃料エンタルピーは0.91~1.05MJ/kg程度であるため、CRGTからの燃料流出はほとんど無い。

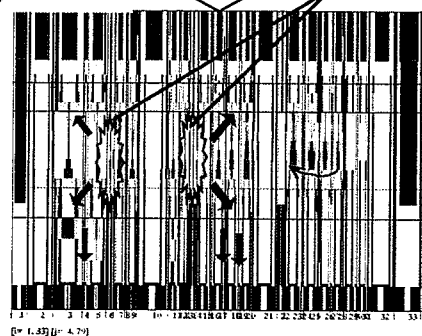


(1) t=0.0s



燃料はほとんど粒子状態。
 炉心領域内の下側には、未破損燃料ペレットが残存。
 反応度 -0.16\$
 出力 3.35Po
 炉心燃料平均温度 2804K

(2) t=2.0s



CRGT壁の破損によるFCI発生（燃料排出を駆動）

分散燃料の落下による反応度印加—分散を繰り返す。
 第1、第2CRGT壁が破損し、FCI発生。
 Na蒸気圧に駆動されて、下部軸ブラ削除部分からの燃料流出が促進される。
 部分プール形成。

図 26 UAB 付き ABLE 炉心シナリオのまとめ

(3) $t=5.0s$



CRGT壁の破損によるFCI発生 (燃料排出を駆動)

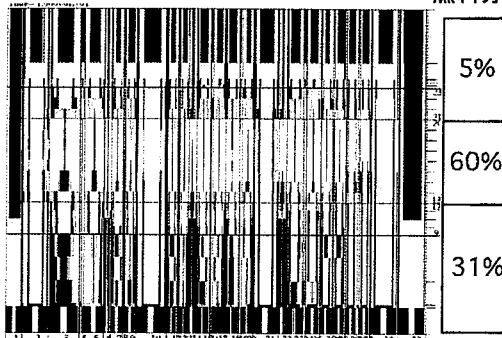


C1,C2領域では、燃料の一部が下部軸ブラ削除部の被覆管を溶融して流出し、下部ガスプレナム部に堆積。
第3 CRGT壁が破損し、FCI発生。Na蒸気圧に駆動されて、C3領域でも、下部軸ブラ削除部分からの燃料流出が促進される。

(4) $t=10.0s$



燃料分布



約3割の燃料は、下部ガスプレナム部とLABピン束間に再配置し、炉心は十分な未臨界状態に到達する。

反応度 -49\$
出力 0.2Po

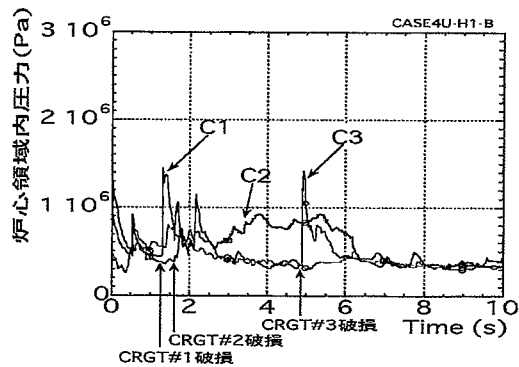
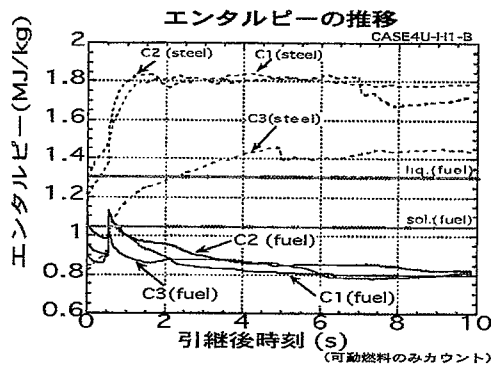
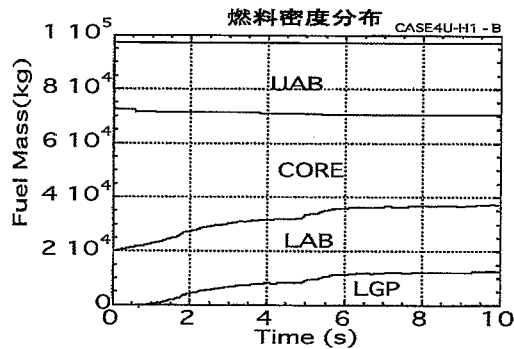
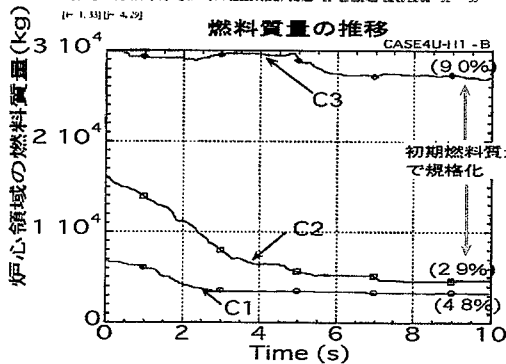


図 26 UAB 付き ABLE 炉心シナリオのまとめ (2)

通常炉心シナリオ

通常炉心シナリオの特徴

1. 部分プールが形成され、旋回流によって短い間隔でピークが出現（落下の場合には約0.5秒）。炉心内のエネルギーが増大し、約3.9秒で即発臨界を超過。
2. CRGT壁破損時には炉心領域内圧力が上昇するが、燃料流出はほとんど無し。CRGT破損時の、CRGT周囲の燃料エンタルピーは、0.93~1.05MJ/kg。

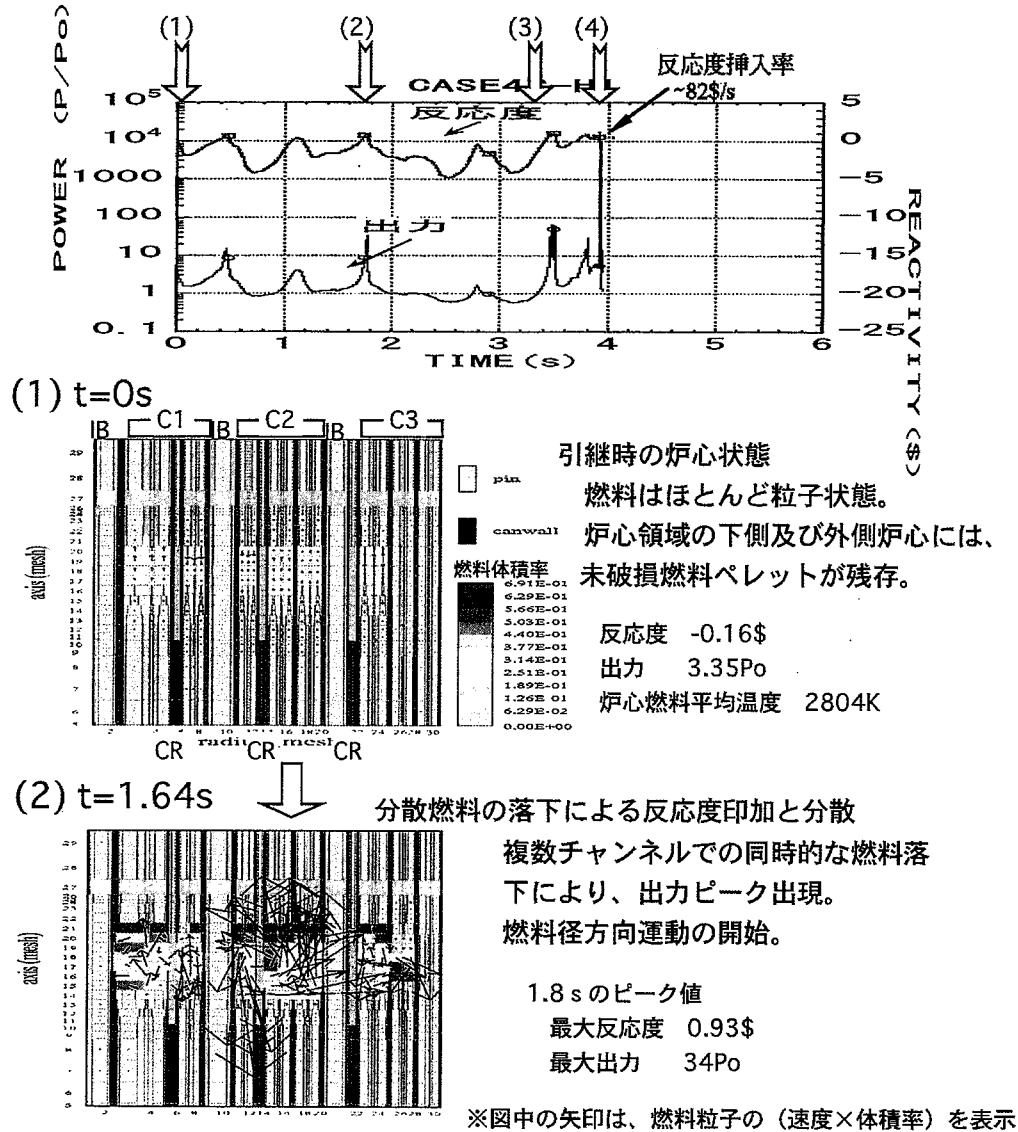


図 27 通常炉心シナリオのまとめ

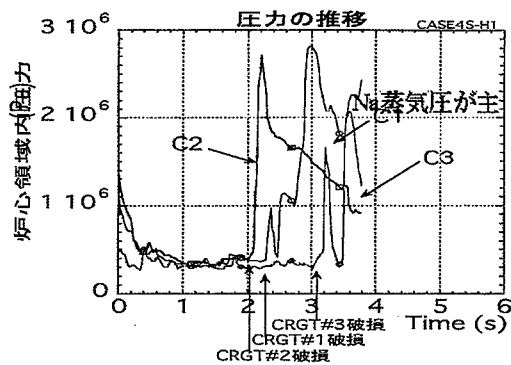
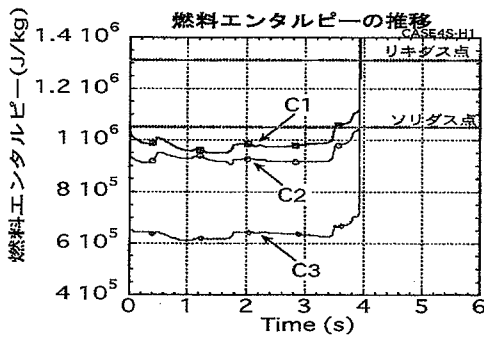
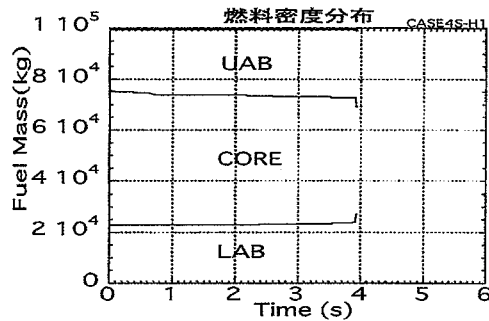
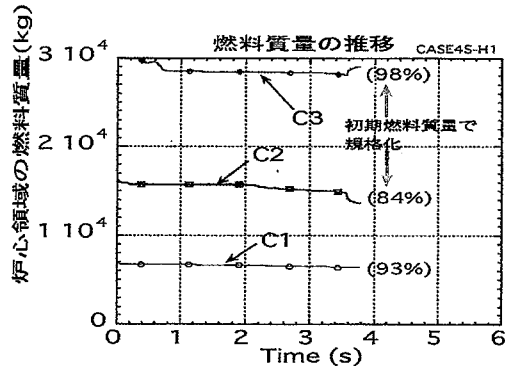
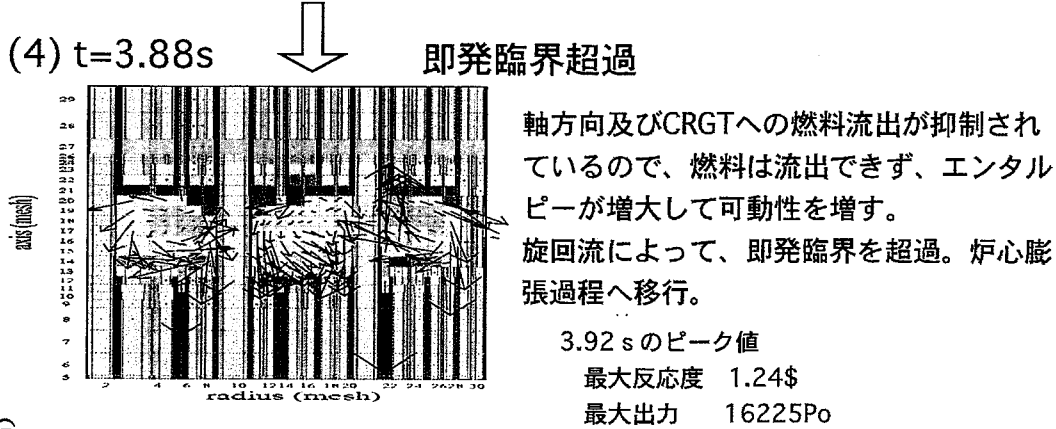
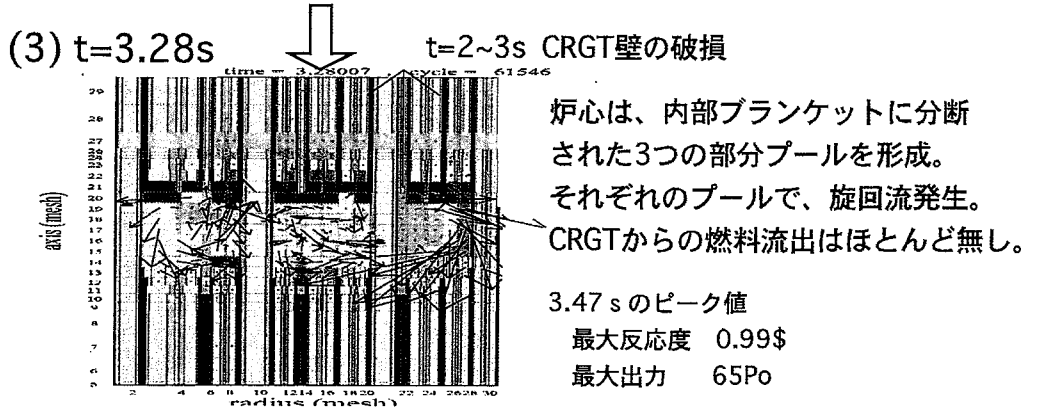


図 27 通常炉心シナリオのまとめ (2)

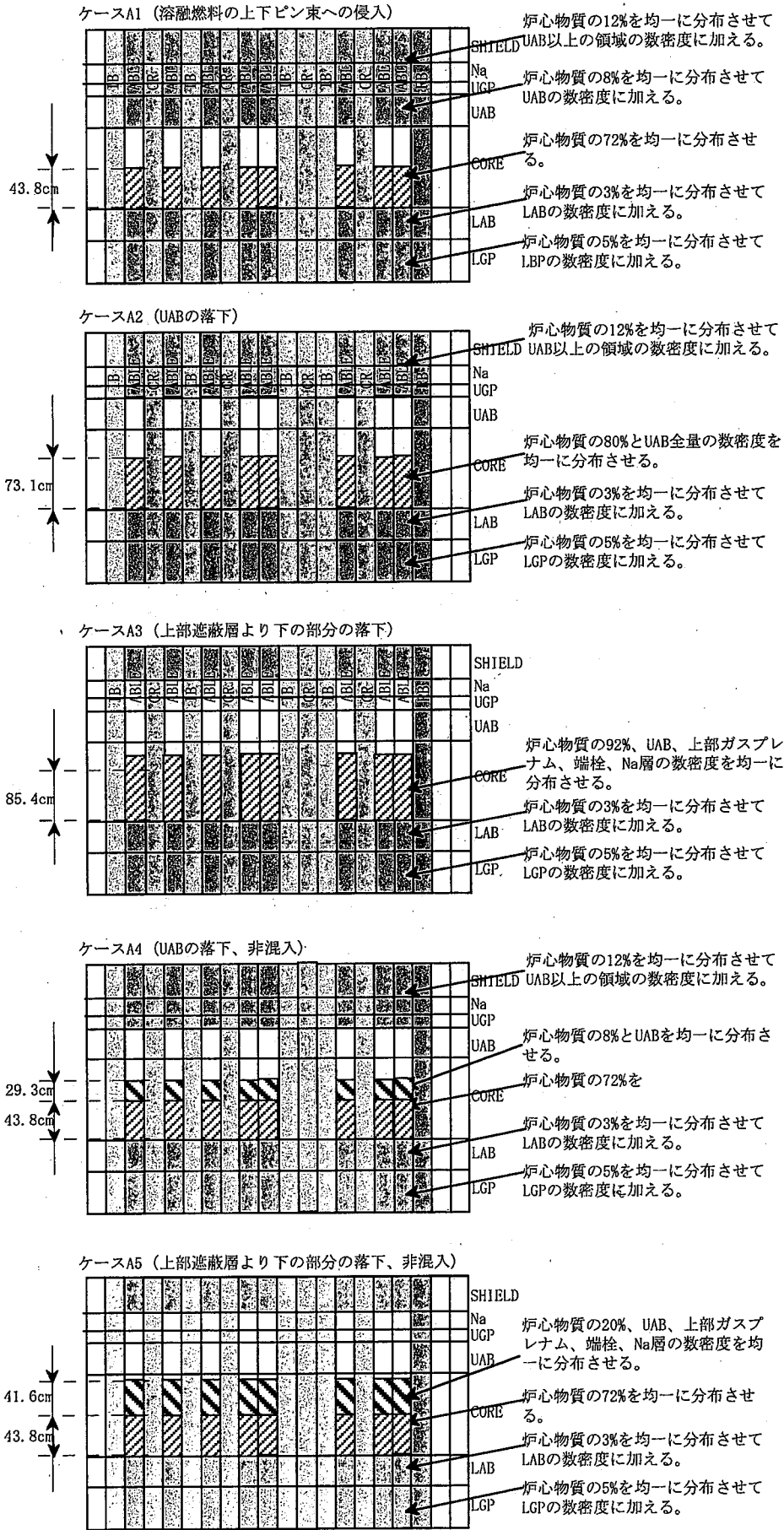
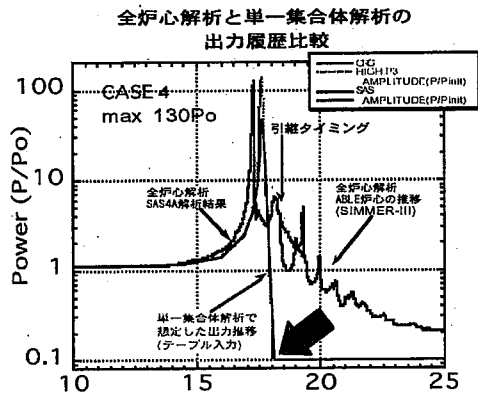
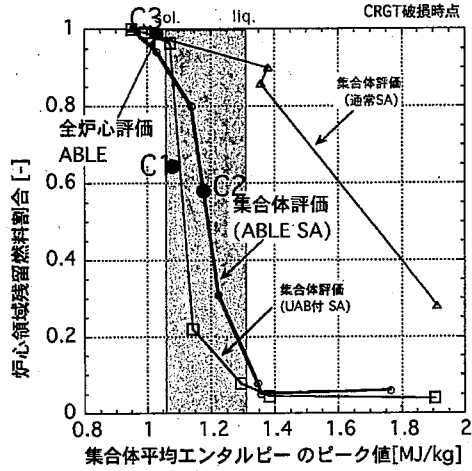


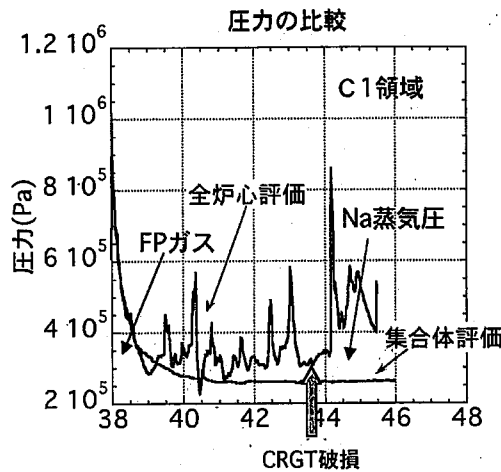
図 28 静的核計算解析ケース



(1) 出力履歴

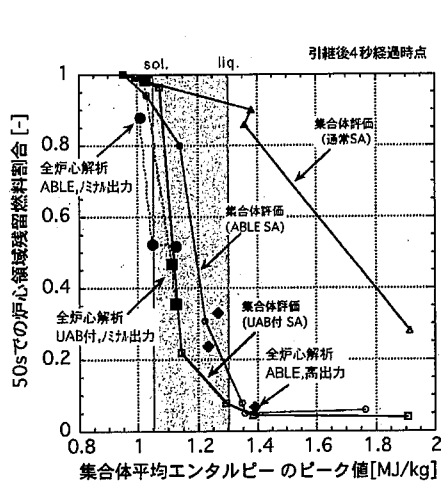


(2) 流出マップ

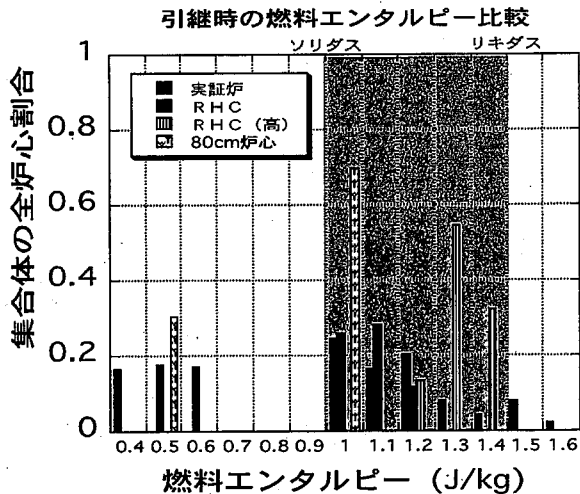


(3) 炉心内圧力

図 29 集合体評価との整合性



(1) 燃料流出マップ



(2) 各炉心の燃料エンタルピー分布

図 30 炉心の ABLE 化による燃料流出量の予測