

# 高転換型ナトリウム冷却MOX燃料中型高速炉の 炉心損傷事象(ULOF)起因過程の特徴

—太径燃料ピン採用による低比出力密度炉心特性が  
ULOF時の炉心挙動へ与える影響—

( 研 究 報 告 )

2003年7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)

2003

## 高転換型ナトリウム冷却 MOX 燃料中型高速炉の炉心損傷事象 (ULOF) 起因過程の特徴

- 太径燃料ピン採用による低比出力密度炉心特性が ULOF 時の炉心挙動へ与える影響 -  
( 研究報告 )

石田政義 \*、川田賢一 \*、丹羽元 \*\*

### 要旨

実用化戦略調査研究(FS)のナトリウム冷却混合酸化物燃料高速炉のカテゴリーで設計検討が進められている高転換型炉心の炉心損傷事象(CDA)想定時の安全特性を、CDA 起因過程解析コード SAS4A を適用して検討した。CDA の代表事象として炉心冷却材流量減少時スクラム失敗事象(ULOF)を選定した。

炉心の燃料体積割合を増加して高内部転換比を達成すべく、直径 11.1mm の太径燃料を採用した上部ナトリウムプレナム付き炉心長 1.2m の中型炉(平成 13 年度検討炉心、略称 UPL120)は平均比出力密度(31 kW/kg-MOX)が従来大型炉心の約 1/2 である。ナトリウムボイド反応度値は炉心部が 6\$、上部ナトリウムプレナムが-1\$である。UPL120 炉心の ULOF 起因過程はノミナル条件下で即発臨界を僅かに超過する出力バーストとなった。その主原因は、(a)比出力密度が従来大型炉心に比べて著しく低いため、出力上昇時の負の即応的フィードバック反応度(ドブラー及び燃料軸方向膨張反応度)による出力上昇の抑制が従来炉心に比べて弱いこと、及び、(b)炉心長が従来大型炉心の 1m に比べて長尺であり、そのため炉心上端部の線出力が低くなり、その結果、比出力密度が低いことも重畳して、ボイド化燃料集合体の燃料破損後の軸方向燃料分散負反応度の挿入が 1m 炉心に比べて遅れることであり、そのため、未・部分沸騰燃料集合体の燃料破損に起因する速いボイド反応度挿入により即発臨界超過を起こした。

この結果を踏まえて、比出力密度を約 43 kW/kg まで増加し、炉心長を 1m 及び 0.8m に短尺化した二つの高転換型中型炉心 Fsm100(炉心ボイドワース 5.7\$)及び Fsm80(炉心ボイドワース 4.9\$)が平成 14 年度に提案された。これらの炉心の ULOF 起因過程は、(a)いずれの炉心ケースともにノミナル条件下では出力バーストは即発臨界以下のマイルドな挙動となり、(b)ボイド反応度ワース及びドブラー係数の設計評価不確かさを保守側に考慮しても、即発臨界以下のマイルドな挙動となり、起因過程は遷移過程へ移行する。両炉心の比出力密度を基準ケースから 34 kW/kg まで(約 20%)下げると ULOF 起因過程は即発臨界超過の出力バーストとなる。これらの結果から、炉心燃料の平均比出力密度は重要な設計パラメータであり、太径燃料の採用により炉心の比出力密度が低くなる特徴がある高転換型炉心の設計では、上記の結果を踏まえた炉心仕様に基づく検討が必要である。

---

\* 大洗工学センター 要素技術開発部 リスク評価研究 Gr

\*\* 大洗工学センター システム技術開発部 FBR 安全設計 Gr

(WBS 番号 : 121120)

# **Safety Characteristics of Mid-sized MOX Fueled Liquid Metal Reactor Core of High Converter Type in the Initiating Phase of Unprotected Loss of Flow Accident**

**- Effects of low specific fuel power density on ULOF behavior brought by employment of large diameter fuel pins -**

Masayoshi Ishida\*, Kenichi Kawada\*, Hajime Niwa\*\*

## **Abstract**

Safety characteristics in core disruptive accidents (CDAs) of mid-sized MOX fueled liquid metal reactor core of high converter type have been examined by using the CDA initiating phase analysis code SAS4A. The design concept of high converter type reactor core has been studied as one of options in the category of sodium-cooled reactor in Phase II of Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System.

An unprotected loss-of-flow accident (ULOF) has been selected as a representative CDA initiator for this study. A core concept of high converter type, which employed a large diameter fuel pin of 11.1mm with 1.2m core height to get a large fuel volume fraction in the core to achieve high internal conversion ratio was proposed in JFY2001. Each fuel subassembly of the core (abbreviated here as UPL120) was provided with an upper sodium plenum directly above the core to reduce the sodium void reactivity worth. Because of the large fuel pin diameter, average specific fuel power density (31 kW/kg-MOX) of UPL120 is about one half of those of conventional large MOX cores. The reactivity worth of sodium voiding is 6\$ in the whole core, and -1\$ in the all upper plenums. Initiating phase of ULOF accident in UPL120 under the conditions of nominal design and best estimate analysis resulted in a slightly super-prompt critical power burst. The causes of the super-prompt criticality have been identified twofold: (a) the low specific fuel power density of core reduced the effectiveness of prompt negative reactivity feedback of Doppler and axial fuel expansion effects upon increase in reactor power, and (b) the longer core height compared with conventional 1m cores brought, together with the lower specific power density, a remarkable delay in insertion of negative fuel dispersion reactivity after the onset of fuel disruption in sodium voided subassembly due to the lower linear heat rating in the top portion of the core. During the delay, burst-type fuel failures in sodium un-voided or partially voided fuel subassemblies caused a high ramp rate insertion of sodium void reactivity due to fuel-coolant interactions, resulting in a super-prompt critical power burst.

Taking into account the ULOF analysis result of the UPL120 core, two alternative concepts of mid-sized core of high converter type were proposed in JFY2002, increasing the average specific fuel power density to 43 kW/kg and reducing the core

height to 1m and 0.8m. These two cores, abbreviated here as Fsm100 and Fsm80, have core void reactivity worth of 5.7\$ and 4.9\$, respectively. The ULOF behaviors in initiating phase of both cores resulted in a mild power burst with net reactivity less than 1\$ under nominal design and best estimate analysis conditions, and even under conditions with a conservative  $2\sigma$  uncertainty on Doppler constant, or on sodium void reactivity worth, the cores showed a mild power burst without exceeding prompt-criticality, though the conservative conditions resulted in a severer power burst. Hence the initiating phase of these alternative cores develops into a transition phase of ULOF scenario. Another parametric study showed that if the specific power density of these alternative cores was to be reduced by 20% from its 43 kW/kg to 34 kW/kg, the ULOF power burst became super-prompt critical. This study has shown that in the core design of high converter type with a large diameter (>10mm) fuel pins, the specific power density of fuel is an important design parameter which affects the safety characteristics of the core in ULOF events, and the above mentioned ULOF results should be taken into account in the continuing core design study.

---

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

\*\* FBR Cycle Safety Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

## 目次

1. 序論.....	1
2. 高転換型中型炉 ULOF 起因過程の特徴.....	5
2.1 高転換型中型炉の炉心特性の特徴.....	5
2.2 ULOF 解析条件.....	8
3. ULOF 過渡解析結果.....	28
3.1 基準ケースの結果.....	28
3.2 パラメータ解析ケースの結果.....	34
3.3 結果の考察と検討.....	54
4. 結論.....	60
記号表.....	62
謝辞.....	63
参考文献.....	64

## List of Tables

表 1.1	FS 高転換型中型炉と既往炉心設計の比較 .....	3
表 2.1a	高転換型中型炉 UPL120 炉心・燃料仕様 - 炉心長 1.2m、比出力密度 31.3 kW/kg-MOX、ボイドワース: 炉心部 6\$(上部フレム-1\$) .....	10
表 2.1b	高転換型中型炉 Fsm100 炉心・燃料仕様 - 炉心長 1m、比出力密度 43.1(kW/kg-MOX)、ボイドワース 5.7\$ .....	11
表 2.1c	高転換型中型炉 Fsm80 炉心・燃料仕様 - 炉心長 0.8m、比出力密度 43.8kW/kg-MOX、ボイドワース 4.8\$ .....	12
表 2.2	断熱条件下で固相融点の燃料を溶融するのに必要な投入エネルギーの比較.....	14
表 2.3a	高転換型中型炉 UPL120 炉心 34 チャンネルの初期定常特性 ...	16
表 2.3b	高転換型中型炉 Fsm100 炉心 43 チャンネルの初期定常特性 ...	19
表 2.3c	高転換型中型炉 Fsm80 炉心 47 チャンネルの初期定常特性 .....	22
表 2.4	平均線出力、初期炉心平均燃料温度、及び炉心燃料総質量の比較.....	26
表 2.5	燃料破損モデル入力定数セット.....	26
表 3.1	ULOF 計算ケースと計算結果.....	30
表 3.2	UPL120 炉心 ULOF 計算ケースと計算結果.....	31
表 3.3	冷却材沸騰開始後の過渡エネルギー放出量の炉心ケース間比較(基準ケース間の比較).....	42
表 3.4	Fsm100 炉心基準ケースの ULOF 起因過程出力バースト終了時の炉心状態 (18.12 秒時点) .....	44

## List of Figures

図 1.1	炉心多チャンネル事故解析コード SAS4A の概念.....	4
図 2.1	Fsm100/Fsm80/UPL120 炉心燃料集合体概念図.....	13
図 2.2	出力 / 流量比 (P/F) 分布比較 - Fsm100/Fsm80/UPL120/Fs80 .....	13
図 2.3a	UPL120 炉心燃料集合体出力分布.....	15
図 2.3b	SAS4A チャンネルによる UPL120 炉心のモデル化.....	15
図 2.3c	UPL120 炉心の燃料集合体出力 / 流量比 (P/F) 分布 - チャンネルモデル依存性.....	16
図 2.3d	UPL120 炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 - SAS4A Ch.34 vs. Ch.59 of UPL120 .....	17
図 2.3e	UPL120 炉心前照射期間中の燃料ピン FP ガス放出率 - SAS4A Ch.34 vs. Ch.59 of UPL120 .....	17
図 2.4a	Fsm100 炉心燃料集合体出力分布.....	18
図 2.4b	Fsm100 炉心 SAS4A チャンネルによる炉心のモデル化.....	18
図 2.4c	Fsm100 炉心の燃料集合体出力 / 流量比 (P/F) 分布 - チャンネルモデル依存性.....	19
図 2.4d	Fsm100 炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 - SAS4A Ch.43 vs. Ch.78 of Fsm100 .....	20
図 2.4e	Fsm100 炉心前照射期間中の燃料ピン FP ガス放出率 - SAS4A Ch.43 vs. Ch.78 of Fsm100 .....	20
図 2.5a	Fsm80 炉心燃料集合体出力分布.....	21
図 2.5b	SAS4A チャンネルによる Fsm80 炉心のモデル化.....	21
図 2.5c	Fsm80 炉心の燃料集合体出力 / 流量比 (P/F) 分布 - チャンネルモデル依存性.....	22
図 2.5d	Fsm80 炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 - SAS4A Ch.43 vs. Ch.78 of Fsm80 .....	23
図 2.5e	Fsm80 炉心前照射期間中の燃料ピン FP ガス放出率 - SAS4A Ch.47 vs. Ch.68 of Fsm80 .....	23
図 2.6a	規格化軸方向線出力分布の炉心間比較 (ULOF 時最初の破損燃料) - Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80 .....	24
図 2.6b	軸方向線出力分布の炉心間比較 (ULOF 時最初の破損燃料) - Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80 .....	24
図 2.6c	規格化燃料比ワース軸方向分布の炉心間比較 (ULOF 時最初の破損燃料) - Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80 .....	25
図 2.7	軸方向燃料初期温度分布の炉心間比較 (ULOF 時最初の破損燃料) - Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80 .....	25



図 2.8	過渡時燃料破損判定の流れ (破損モデル: MFAIL=11) .....	27
図 3.1	Fsm80, Fsm100 と UPL120 炉心の ULOF 比較 - 炉出力と全反応度 (基準ケース) .....	35
図 3.2a	Fsm100 炉心 ULOF 結果 - 反応度.....	35
図 3.2b	Fsm100 炉心 ULOF 結果 - 過渡後半の反応度.....	36
図 3.2c	Fsm100 炉心 ULOF 結果 - 反応度の時間微分(Ramp rate) .....	36
図 3.3a	UPL120 炉心 ULOF 結果 - 全反応度と反応度成分.....	37
図 3.3b	UPL120 炉心 ULOF 結果 - 過渡前半の主要反応度.....	37
図 3.3c	UPL120 炉心 ULOF 結果 - 過渡後半の反応度.....	38
図 3.3d	UPL120 炉心 ULOF 結果 - 全反応度と反応度挿入率.....	38
図 3.3e	Fsm100 と UPL120 炉心の ULOF 比較 - 燃料及び全反応度 (基準 ケース) .....	39
図 3.4a	Fsm80 炉心 ULOF 結果 - 反応度.....	39
図 3.4b	Fsm80 炉心 ULOF 結果 - 過渡後半の反応度.....	40
図 3.4c	Fsm80 炉心 ULOF 結果 - 反応度の時間微分(Ramp rate) .....	40
図 3.5a	Fsm80 と UPL120 炉心の ULOF 比較 - 燃料及び全反応度 (基準ケ ース) .....	41
図 3.5b	Fsm80 と Fsm100 炉心の ULOF 比較 - 燃料及び全反応度 (基準ケ ース) .....	41
図 3.6a	炉出力上昇に対する燃料温度反応度挿入率の比較 - (燃料温度 反応度 = Doppler + Fuel expansion) .....	42
図 3.6b	過渡末期の炉出力と燃料移動反応度挿入挙動の比較 - 燃料分 散反応度挿入挙動の比出力密度依存性の比較.....	43
図 3.6c	過渡末期の燃料及びボイド反応度挿入率の比較 - 燃料及びボ イド反応度挿入率の比較.....	43
図 3.6d	Fsm100 基準ケースの起因過程末期の各チャンネルの物質分布 (1/3) 状態(Ch.1-15).....	45
図 3.6d	Fsm100 基準ケースの起因過程末期の各チャンネルの物質分布 (2/3) 状態(Ch.16-30).....	46
図 3.6d	Fsm100 基準ケースの起因過程末期の各チャンネルの物質分布 (3/3) 状態(Ch.31-43).....	47
図 3.7	Fsm100/ Ref vs. ボイドワース増ケース - 炉出力と全反応度... ..	49
図 3.8a	Fsm100/ ボイドワース = 8.4\$ - ULOF 後半の反応度.....	49
図 3.8b	Fsm100/ ボイドワース = 8.4\$ - 反応度挿入率.....	50
図 3.9	Fsm100/Ref vs. ボイドワース増ケース - 炉出力、反応度(全反 応度/ボイド/燃料移動) .....	50

図 3.10a	Fsm80/ Ref vs. Doppler 係数 20%減ケース - 炉出力と全反応度	51
図 3.10b	炉出力上昇に対する燃料温度反応度挿入率の比較 - 基準ケースと Doppler 係数 20%減ケースの比較.....	51
図 3.11a	Fsm100 炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 - Fsm100/Ch.43 Ref vs. Pd2 .....	54
図 3.11b	Fsm100 炉心前照射期間中の燃料ピン FP ガス放出率 - Fsm100/Ch.43 Ref vs. Pd2 .....	55
図 3.12a	Fsm100/Ref vs. Pd2 - 炉出力と全反応度.....	55
図 3.12b	Fsm100/Ref vs. Pd2 - 炉出力と全反応度.....	56
図 3.13	Fsm100 (78chm)/Ref vs. Pd2 - 燃料破損後の燃料、冷却材反応度増分と全反応度.....	56
図 3.14a	Fsm80/Ref vs. Pd2 - 炉出力と全反応度.....	57
図 3.14b	Fsm80 (47chm)/Ref vs. Pd2 - 燃料破損後の燃料、冷却材反応度増分と全反応度.....	57
図 3.14c	Fsm80 (68chm)/Ref vs. Pd2 - 燃料破損後の燃料、冷却材反応度増分と全反応度.....	58

## 1. 序論

実用化戦略調査研究(FS: Feasibility Study)[1,2]の一環として、ナトリウム冷却混合酸化物(MOX)燃料高速炉のカテゴリーでは、従来型の大型炉心に対して、内部転換比(炉心部の増殖比)を 1 に近づけた高転換型炉心の設計が検討されている。高内部転換比を実現するために炉心部の燃料体積率を 40%近くまで増加する必要があり、そのため設計検討では、従来炉心の燃料ピン(直径 8.5~9mm)に比べて太径の燃料(直径 10mm~11mm)を採用した炉心が検討されている。炉心概念の検討に対して、安全設計の観点から設定された条件として、設計基準外炉心損傷事象(CDA)に対しては「再臨界排除」の概念を設計に取り込むことが要求されている。この要件は、これまでの原型炉及び実証炉と大型炉に対する CDA 研究の結果に基づくものである。

炉心の安全設計では、炉心損傷事象の代表事象として炉心冷却材流量減少時スクラム失敗事象(ULOF: Unprotected Loss-of-Flow)を取り上げ、ULOF 時の「再臨界排除」を達成するために、炉心冷却材ナトリウムのボイド反応度ワース設計ノミナル値を 5\$~6\$以下とすることを要求している。この条件は、ULOF 事象の初期の過程(起因過程)で生じる「炉出力バーストの規模を比較的穏やかなものに抑える」ためのもので、後続する遷移過程の早期段階で「再臨界排除」達成のために考案されている ABLE、FAIDUS 等の、燃料集合体毎に設置された燃料排出助長機構により、大きなエネルギー放出を生ずることなく、熔融燃料を炉心外へ排出して恒久的未臨界を達成するシナリオを構築のために必要な条件の一つである。

もし ULOF 起因過程がノミナル評価条件の下で、全反応度が 1\$を超過する(即発臨界超過)シナリオとなる場合には、評価の不確かさを考慮した場合には起因過程において大きなエネルギー放出を伴う場合が考えられる。このため、上記の「起因過程の出力バーストを比較的穏やかなものに抑える」との条件は、起因過程で全反応度が 1\$を超過するシナリオとはならないことが示されれば、満たされたと考える。そのような場合は、炉心燃料集合体の境界であるラッパー管壁が破壊されることなく遷移過程へ移行し、ABLE または FAIDUS 等の機構により燃料を集合体毎に排出するシナリオを構築できる可能性が残されるからである。なお、設計で考慮すべき合理的な不確かさの範囲内で起因過程の炉出力バーストを 1\$以下のシナリオに制限することは、十分条件ではあるが、必ずしも必要条件ではないことに留意する。必要十分条件は「再臨界排除」を達成することであり、その限りでは起因過程が 1\$を超過するシナリオとなることを排除するものではない。

高内部転換型炉心の一つとして最初に提案された(平成 13 年度)上部ナトリウムプレナム付き中型炉心[3]は、直径 11.1mm の太径燃料ピンを採用した 1.2m 長の炉心である(以下では、この炉心を UPL120 炉心とも略記する)。炉心部のナトリウムボイド反応度ワースは 6\$あり、これを軽減するために、炉心直上に上部ナトリウムプレナム(40cm 長)を設置して、ここがボイド化した場合に約 -1\$の負のボイド反応度効果が得られるとしている。CDA 起因過程解析コード SAS4A を適用した解析結果によると、UPL120 炉心の ULOF 起因過程はノミナル解析条件下で全反応度最大値が 1\$を幾分超過する結果となった。解析結果の分析・検討に基づき、ULOF 起因過程が即発臨界超過となった主原因は、(1)UPL120 炉心燃料の比出力密度が既往研究炉心に比して約 1/2 と低いこと(太径燃料仕様でもたらされた特性)、また、(2)炉心長が 1.2m の長尺であることによるものと結論して、安全設計側から炉心設計側へ、これらの二つの設計仕様を許容される範囲で従来炉心仕様に近づけることを提言した。その結果、平成 14 年度の検討炉心として、炉心長を 1m、及び 0.8m とし、比出力密度を UPL120 炉心(31 kW/kg-MOX)よりも約 40%弱増加した二つの高転換型中型炉心設計が提案された[4]。これらの炉心をここではそれぞれ、Fsm100 及び Fsm80 炉心と略称する。これらの 3 炉心の設計仕様の安全性に係わる特徴を、既往の大型炉設計と比較して表 1.1 に整理した。これらの 3 炉心はいずれも熱出力が大型炉心(FS120/FS80)の約 1/2 の中型炉級である。これらの 3 炉心の比出力密度は 31 ~ 44 kW/kg-MOX であり、既往炉心設計の 53 ~ 66 kW/kg-MOX に比べて顕著に低い。燃料ピンの許容最大線出力密度はピン径にはよらず、燃料中心溶融限界線出力で制限されるため、大型炉と高転換型中型炉で大差はないが、後者の方が幾分低い線出力の設計となっている。これも比出力密度を下げる結果となっている。

本報告ではこれらの高転換型中型炉の ULOF 起因過程の炉心挙動を、安全解析コード SAS4A[5](図 1.1)を適用して解析し、従来大型炉心の ULOF 挙動との比較も含めて、ULOF 起因過程の特徴を明らかにし、今後の高転換型炉心設計仕様の検討に資する。

表 1.1 FS 高転換型中型炉と既往炉心設計の比較

Table 1-1 Comparison of design parameters						
Proposed Core Designs =>	120cm中型炉FS (上部Naプレンラム付) (UPL120)	100cm中型炉FS (炉心既見化, 比出力増) (Fam100)	80cm中型炉FS (炉心既見化, キイアワース減) (Fam80)	120cmFS大型炉 (Fs120)	80cmFS大型炉 (Fs80)	実証炉 (Low burnup core) DFBR
Thermal power (MWt)	1190	1795	1795	3900	3900	1600
Coolant inlet/exit temperatur (C)	395/650	395/650	395/650	395/650	395/650	395/550
Average Pu-enrichment Pu(U+Pu) (%)	IC: 17.0/OC: 21.1	19.3/23.0	21.1/25.3	17.1/19.4	22.2/27.7	19.8
Average burnup (MWd/kgHM)	152	149	149	150	150	89
Core fuel inventory(MOX) (ton)	39	41.4	40.9	72	59	26
Average breeding ratio: Core/Core+Blanket	0.919 / 1.006	0.922 / 1.039	0.754 / 1.036	1.05	1.03	1.16
Average power density (W/cc of core vol.)	124	166	168	192	233	228
Average fuel specific power density (kW/kg-MOX)	31.3	43.1	43.9	52.8	65.5	61.5
Average linear heat rating (kW/m)	21.3	24.7	25.6	27.3	26.9	25.0
Equip. core diameter (m)	3.2	3.7	4.1	4.6	5.1	3
Core height (cm)	120	100	80	120	90	100
Axial blankets: UAB/LAB (cm)	0/20	30/30	30/30	10/12	4/40	35/35
Fuel pin diameter (mm)	11.1	10.4	10.5	9.7	9.8	8.5
Core material Vol. fr. (%)						
Fuel	40.6	39.6	40	37.2	36.7	39
All Steel	26.3	26.6	26.66	20.7	26.4	22.8
(Cladding+wire steel only)	14.5	16.3	16.48	13	14.5	12.6
All Sodium	29.2	27.7	27	36.3	32.1	32.9
(Sodium in pin bundle)	25.7	25.4	22.75	27.8	25.2	25.7
Void(gap+hole)	6.9	6.5	6.34	5.9	5.8	5.9
Fuel + Steel Vol. Fraction inside wrapper tube (-)	0.66	0.65	0.66	0.60	0.64	0.62
No. of fuel assemblies (All)	276	333	402	462	576	296
(C/O/C)	162/114	183/150	246/156	252/210	378/198	199/96
No. of fuel pins per assembly	169	217	217	234/271	294/331	217
Inner duct (C/O/C)	None	None	None	Yes/No	Yes/No	None
No. of control rods	19	25	37	26	48	30
No. of inner blankets	None	None	None	None	None	None
Core material worth (\$)						
Fuel	83	96	99	69	100	33
All Steel	-34	-23	-21	-18	-19	-19
Clad	-14	-14	-13	-11	-11	-11
Pin-bundle sodium void	6.0 (UPL=-1.0)	6.7	4.9	7.3	6.0	3.5
Max positive void worth of above	6.0	5.7	4.9	7.4	5.2	3.7
Core Doppler Td/dT (not including steel Doppler)						
Na-in	-6.99E-03	-5.34E-03	-4.99E-03	-6.09E-03	-5.47E-03	-6.62E-03
Na-out	-5.12E-03	-4.23E-03	-3.90E-03	-4.44E-03	-4.04E-03	-4.66E-03
Beta effective	3.51E-03	3.29E-03	3.29E-03	3.45E-03	3.36E-03	3.91E-03

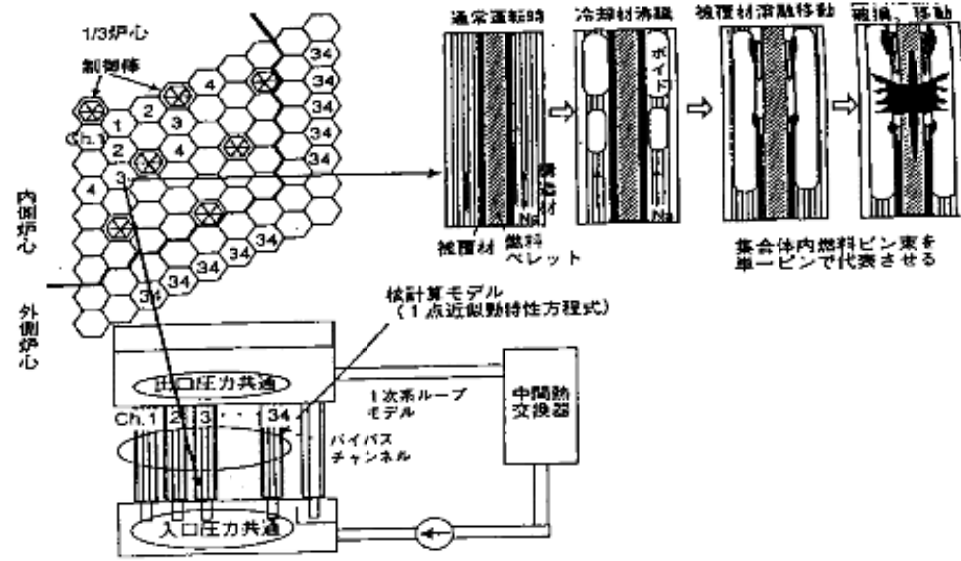


図 1.1 炉心多チャンネル事故解析コード SAS4A の概念

## 2. 高転換型中型炉 ULOF 起因過程の特徴

### 2.1 高転換型中型炉の炉心特性の特徴

高転換型中型炉 UPL120、Fsm100、及び Fsm80 三炉心の炉心/燃料仕様を表 2.1a～表 2.1c に示す。これらの炉心と既往設計大型炉 FS120MOX/FS80MOX の炉心特性を比較する以下の通りである(表 1.1 参照)。

- 1) プラント熱出力 - 大型炉の 3800MWt に対して、高転換型中型炉はその 1/2 以下である。
- 2) 平均取出燃焼度 - FS の共通設計条件により約 150 MWd/kgHM
- 3) 増殖比(炉心+ブランケット) - 中型炉(径ブランケットなし) 1.005～1.038、大型炉 1.03～1.05
- 4) 平均線出力 - 中型炉 21～26 kW/m、大型炉 27 kW/m
- 5) 炉心燃料平均比出力密度 - 中型炉 31～44 kW/kg-MOX、大型炉 53～66 kW/kg-MOX
- 6) 燃料ピン直径 - 中型炉 10.4～11.1 mm、大型炉 8.8～9.7 mm
- 7) 炉心燃料体積比 - 中型炉 40%、大型炉 37%
- 8) 炉心燃料ピン束部ボイド反応度ワース - FS120 炉心を除くと、両グループの炉心ともに 5\$～6\$以下の安全設計制限条件を満たす。FS120 炉心はこの条件を満たしていない。
- 9) 炉心部 Doppler 係数  $Tdk/dT$ (燃料富化度に依存) -  $-5.0E-3$ ～ $-6.8E-3$  ( $-5.0E-3$  等の表記は $-5.0 \times 10^{-3}$ を表す。)

高転換型中型炉燃料集合体の概念を図 2.1 に示す。UPL120 燃料集合体は炉心直上に 40cm 長のナトリウムプレナムを持ち、ここの冷却材がボイド化すると公称 -1\$の反応度効果がある。Fsm100 の燃料集合体長は Fsm80 よりも炉心長の差の 20cm 分長い。これら両炉心の上下軸ブランケット長はそれぞれ 30cm で同じである。UPL120 の下部軸ブランケット長は 20cm で、上部軸ブランケットは無い。炉心燃料集合体の出力 P と流量 F の比 P/F の頻度分布を図 2.2 に示す(比較のために Fs80 も示した)。どの炉心ケースとも、特に安全特性を意図した P/F 分布を設計に取り込んではいない。

#### < 安全性と炉心仕様の関係 >

##### (1) 炉心燃料の比出力密度と反応度挙動

ナトリウムボイド反応度ワースが 5\$～6\$を有する炉心の ULOF 時の反応度挙動は、時系列的に概略以下の通り説明できる。

- 1) 主要な反応度挿入は冷却材沸騰開始以降始まる。沸騰領域の拡大(軸方向

沸騰領域の炉心中心部への拡大と沸騰集合体数の増加)による正のボイド反応度挿入により炉出力が顕著に上昇する。この出力上昇に対して、負の即応的燃料温度反応度フィードバック(Doppler 効果と燃料軸方向膨張反応度)が生じて、全反応度の上昇速度は抑制される。

2) 出力上昇に起因して沸騰先行集合体の燃料溶融が進展し、概略、初期の出力、出力/流量比の高い集合体の順に、崩壊型の燃料破損が起きる。この時点で、炉出力は、炉心のボイドワース及び Doppler 係数の大きさに依存して、定格値の数十倍から 100 倍に達している。

3) 冷却材が未沸騰または部分沸騰状態の中・低出力、出力/流量比)集合体の燃料も、この高い炉出状態で燃料溶融が進展し、やがてバースト型の破損を引き起こす。

4) 沸騰先行集合体で起きる最初の燃料破損発生後、高々0.1秒の間に、燃料破損に起因する正・負の反応度挿入が競合し、全反応度の到達最大値に依存して起因過程の炉出力バースト(エネルギー放出)の規模が決まる。主要な正の反応度挿入は 3)のバースト型燃料破損に伴う溶融燃料と冷却材の熱的相互作用(FCI)によってもたらされるランプレートの高いボイド反応度の挿入である。主要な負の反応度挿入は、まず即応的な Doppler と燃料軸方向膨張反応度があり、ついで、2)の崩壊型破損燃料集合体で燃料溶融の拡大に伴い、炉中心部での FP ガス圧の発生を待って燃料が集合体内を軸方向へ分散することによる負の反応度挿入がある。

5) 炉心燃料の積分反応度ワースはナトリウムのその約 20 倍の大きさを持つため(表 1.1 の Core material worth の欄参照)、燃料分散反応度挿入が始まると、仮に FCI に起因する高いランプレートのボイド反応度挿入が持続しても、燃料分散反応度挿入で相殺されるため、全反応度は減少し、起因過程の出力バーストは終息する。

これらの反応度挙動の進展の中で、燃料分散反応度挿入が始まる前の主要な負の反応度効果となる即応的な燃料温度反応度の挿入挙動は、炉心設計パラメータである比出力密度と密接に関係している。即ち、断熱条件下では燃料の即応的フィードバック反応度挿入率  $\frac{d\beta}{dt}$  (\$/s)は近似的に次式で評価できる。

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{dt} &= - |K_{Dop} + K_{Fuel}| [\rho_p(t) / (M_0 C_p)] \\ &= - |K_{Dop} + K_{Fuel}| [(P_0 / M_0) / C_p] \times P(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$|K_{Dop} + K_{fuel}|$ : Doppler 及び燃料軸方向膨張反応度温度係数の和の絶対値(\$/K)。(本 SAS4A 解析では後者は Doppler 温度係数の概略 1/2 の大きさとなる)。



$P(t)$ : 規格化過渡炉出力( $P_0$ )、 $P_0 \times P(t)$ は過渡炉出力絶対値 (W)

$P_0$ : 初期炉心出力(定格出力とする)(W)  $P(t=0)=1$  とする。

$MoCp$ : 炉心燃料(質量  $Mo$ (kg))の全熱容量(J/K)、 $Cp$ : 燃料比熱 (J/kg/K)。

$[PoP(t)/(MoCp)]$ : 燃料が断熱状態にあるとき過渡出力  $P_0P(t)$ での炉心平均燃料温度上昇速度(K/s)。(Po/Mo)が炉心平均燃料比出力密度(kW/kg-Oxide)である。

式(1)は以下のように解釈できる。反応度係数  $|KDop+Kfuel|$  がほぼ同じ二つの炉心間で比較すると、同じ規格化過渡炉出力レベル  $P(t)$  (絶対出力レベルは異なる)では、比出力密度( $P_0/Mo$ )の大きな炉心ほど、負の(Doppler+燃料軸方向膨張反応度)フードバック反応度挿入率が大きく、正のボイド反応度挿入による全反応度の増加速度を抑える受動的なブレーキが強くはたらく。そのため、燃料が可動化して分散反応度挿入が始まるまでに到達しうる全反応度の最大値は、従って、その時点までの(規格化)炉出力上昇も、比出力密度の大きな炉心ほど、小さく抑えられる。この炉出力上昇抑制特性が弱いほど、出力のオーバーシュートが大となり、未・部分沸騰集合体の燃料破損発生数が増加するため、FCI 発生によるランプレートの大きな正のボイド反応度挿入が起きやすくなる。負の燃料分散反応度挿入が始まるまでに起きる未・部分沸騰集合体の燃料破損発生数が多くなるほど、全反応度が 1\$を超過する可能性は高くなる。このため、式(1)の即応的燃料温度反応度挿入特性は重要である。

なお、式(1)は、同じ比出力密度をもつ炉心では、負の Doppler 係数  $Tdk/dT$  の大きな炉心ほど全反応度の上昇速度は抑制され、従って、燃料が可動化するまでに到達する全反応度の値は小さくなる、というよく知られた特性も表している。

## (2) 燃料ピンと冷却材の熱伝達

各燃料集合体の冷却材が沸騰し、ボイド化するまでの熱伝達挙動は主に当該集合体の燃料ピン線出力と被覆管表面熱伝達率、及び出力/流量比に依存する。従って、燃料ピン径が異なるために比出力密度が異なる炉心でも、燃料ピン線出力及び出力/流量比分布がほぼ同じ炉心では沸騰によるボイド反応度挿入挙動に大きな違いはない。

## (3) 燃料ピン溶融時間と破損挙動

冷却材がボイド化して近似的に断熱条件下にある燃料ピンが崩壊するためにはいくつかの条件が満たされる必要があるが、その一つは燃料の断面溶融割合がある一定値(重量割合で約 20%)を超過することである(後述の図 2.8 及び表

2.5 参照)。断熱条件下でこの燃料溶融に要するエネルギーを定格出力条件で投入する場合に要する時間(fps: full-power-second)は比出力密度に逆比例する。表 2.2 にその値を比較した。表 2.2 で固相融点下の 1kg の燃料溶融に必要な投入エネルギーはすべて同じ値で、燃料の溶融潜熱(2.67E5 J/kg)に等しい。表は定格出力でこのエネルギー投入に必要な時間(fps)を比較したものである。最右欄は定格出力で燃料ピンの軸方向の局所を崩壊させる(20%断面溶融)に必要な fps の相対値を示し、燃料ピン径(燃料ピン線質量)が大で、かつ、比出力密度が低い炉心ほど、大きな値となる。この値が大きいほど燃料崩壊後の燃料分散反応度挿入に時間がかかる。

## 2.2 ULOF 解析条件

### (1) はじめに

序論に記述したように、これらの三炉心の ULOF 起因過程解析は、時系列的には UPL120 の解析が最初を実施され、その結果がノミナル条件下で即発臨界を僅かに超過する結果となったため、そのような結果へ導いた要因の分析結果を踏まえて、炉心仕様を変更した Fsm100 炉心の設計が提案された。Fsm80 炉心は、Fsm100 炉心に比してさらに ULOF 起因過程が緩和されると予想された設計仕様となっている。以下の解析結果記述では、まず UPL120 炉心と Fsm100 炉心の ULOF 解析結果を比較し、Fsm80 炉心の結果は三者または Fsm100 との二者比較の形で記述する。

### (2) 炉心のモデル化

SAS4A コードによる ULOF 解析のために、類似の特性の炉心燃料集合体をまとめて平均化した集合体で近似した。採用した SAS4A チャンネルモデルは以下の通りである。

炉 心	少数チャンネルモデル	多数チャンネルモデル	備 考
UPL120	34	59	図 2.3a-2.3e
Fsm100	43	78	図 2.4a-2.4e
Fsm80	47	68	図 2.5a-2.5e

備考欄に引用した図に、それぞれの炉心とチャンネルモデルの対応、及び炉心燃料集合体の出力/流量比分布を示した。冷却材入口/出口温度条件は 3 炉心で共通である(それぞれ 395 /550 )。

### (3) 定常前照射計算結果

ULOF 事故解析の初期炉心状態は、各炉心の平衡サイクル末期(EOEC)の炉心

状態の一つに対応する。この状態は SAS4A による定常前照射挙動計算結果として得られる。計算結果から、各 SAS4A チャンネルの燃料ピン温度、及び FP ガス放出率を以下の図表に示した。

UPL120: 表 2.3a, 図 2.3d, 2.3e

Fsm100: 表 2.3b, 図 2.4d, 2.4e

Fsm80: 表 2.3c, 図 2.5d, 2.5e

図は各炉心の二つのチャンネルモデルケースを、便宜的に併記した(図で多数チャンネルモデルの軸を圧縮したものが少数チャンネルモデルケースに対応する)。初期定常状態のチャンネル特性表は少数チャンネルモデルケースのみを示した。いずれの炉心ケースも局所ピーク燃焼度は、FS の設計検討条件に従って、約 20 at.% である。燃料ピン平均の FP ガス放出率はどの炉心ケースもおおよそ 80%(燃焼度の高い燃料) ~ 40%(燃焼度の低い燃料)の範囲にあり、大きな違いはみられない。全炉心燃料の初期平均温度と燃料総質量を比較すると表 2.4 の通りである。四者の中で平均線出力が最も低い UPL120 炉心の燃料平均温度は他に比して約 70K 低い。図 2.6a~2.6c に炉心の軸方向線出力(相対値及び絶対値)、燃料比反応度ワース(軸ブランケット部は炉心部ワースの外挿線であり、炉心燃料がブランケット部へ移動した場合の反応度変化の計算に使用する)の軸方向分布形状、及び初期定常の燃料中心/表面温度分布を比較して示した。表示したチャンネルは各炉心ケースの ULOF 解析結果で最初に崩壊型燃料破損(Levitate type failure: Levitate は SAS4A コードの中で冷却材が沸騰し、ボイド率が 70% を超える集合体内の燃料破損を扱うモデルの名称)を起こしたチャンネルである。後述する過渡計算結果で燃料分散反応度挿入挙動を比較する際にこれらの図を引用する。UPL120 炉心の出力分布が軸方向炉中心に関して非対称なのは上部軸ブランケットが無いため、炉心上端部の中性子束レベルが下端部よりも低いことに起因している。

#### (4) 過渡解析条件

各炉心ケースに共通した解析条件は以下の通りである。

- 1) ULOF 時の主ポンプ流量半減時間は 5.5 秒とする。
- 2) 基準ケースでは設計ノミナル条件と SAS4A 計算モデルの公称最確条件を用いて計算する。
- 3) 燃料破損条件には照射済み燃料に対する CABRI 試験データ解析に基づく入力パラメータセットを使用する。

燃料破損条件にかかわる入力データを表 2.5 に示す。この表はサイクル機構(JNC)が推奨する燃料破損モデル(MFAIL=11 option)で使用する入力パラメータセットである。図 2.8 に燃料破損判定の流れ図を示す。表 2.5 の設定では、燃

## 表 2.1a 高転換型中型炉 UPL120 炉心・燃料仕様

### 炉心長 1.2m、比出力密度 31.3 kW/kg-MOX、ボイドワース:炉心部 6\$(上部プレナム-1\$)

表 3.2.2.1-6 選定炉心の主な燃焼特性

項目	選定炉心	備考 (長期運転サイクル炉心)	
原子炉熱出力 (MWth)	1,190	1,190	
運転サイクル長さ(日)	710(約23ヵ月)	1065(約35ヵ月)	
燃料交換バッチ数	6	4	
Pu富化度 (wt%)[内側/外側]	17.0 / 21.1	17.3 / 21.4	
取出平均燃焼度 (GWd/t)[炉心/軸ブラ/実効]	152 / 26 / 134	152 / 25 / 134	
実効増倍率(-)	平衡初期	1.011	1.019
	平衡中期	1.006	1.010
	平衡末期	0.9999	1.0001
燃焼反応度 (%Δk/kk)	1.110	1.81	
増殖比(-) [炉心/軸ブラ/合計]	平衡初期	0.933 / 0.085 / 1.019	0.932 / 0.084 / 1.016
	平衡末期	0.905 / 0.089 / 0.994	0.894 / 0.089 / 0.983
	平均	0.919 / 0.087 / 1.006	0.913 / 0.087 / 1.000
炉心平均出力密度 (W/cc)[平衡平均]	121	121	
炉心部平均線出力密度 (W/cm)[平衡平均]	207	207	
最大線出力密度 (W/cm) *1 [内側/外側]	平衡初期	329 / 331 (316 / 290)	(310 / 294)
	平衡末期	327 / 304 (330 / 274)	(331 / 269)
出力分担率 (%) [炉心/軸ブランケット]	平衡初期	97.7 / 2.3	97.9 / 2.1
	平衡末期	96.9 / 3.1	96.7 / 3.3
ピーク高速中性子束 ( $\times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> sec)[平衡中期]	1.44	1.43	
ピーク高速中性子フルエンス ( $\times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup> )	5.30	5.28	
初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)	7.31	7.40	
炉心部トップラ係数 ( $\times 10^{-3}$ Tdk/dT)[平衡初期/末期]*2	-7.1 / -6.8	-	
ボイド反応度 (\$) *2 [平衡末期]	炉心部	6.1	-
	上部ナトリウムプレナム部	-1.0	-
	合計	5.1 (5.6)	-

\*1: 3次元解析結果、( )内は燃焼ミスマッチファクタ考慮した2次元RZ解析結果  
 \*2: 炉心燃料部を+500℃、非均質効果=1.05  
 \*3: ラップ管内側のみボイド化、β=0.00331、非均質効果=0.90、輸送補正係数 (Naプレナム)=0.85  
 ( )内はNaプレナム効果を1/2としたときの値

表 3.2.2.1-5 選定炉心の燃料仕様

項目	単位	仕様		
燃料	材料(炉心/軸ブランケット)	-	(Pu,U)O <sub>2</sub> / UO <sub>2</sub>	
	型式(炉心/軸ブランケット)	-	振動充填/ペレット	
被覆管	材料	-	ODS鋼	
	外径	mm	11.1	
	内径	mm	9.74	
	肉厚	mm	0.68	
燃料要素	全長	mm	2785	
	燃料スタック長 炉心	mm	1200	
	軸ブランケット(上/下)	mm	- / 200	
	ガスプレナム長さ(上部/下部)	mm	50 / 1260	
	端栓長さ(上部/中間/下部)	mm	20 / 25 / 30	
	ペレット径(炉心/軸ブランケット)	mm	- / 9.55	
	燃料スミア密度(炉心/軸ブランケット)	%	82.0 / 91.4	
スプーサ	材料	-	PNC-FMS鋼	
	型式	-	ワイヤ	
	ワイヤ径	mm	1.16	
	ワイヤ巻き付けピッチ	mm	200	
ラップ管	材料	-	PNC-FMS鋼	
	外対面幅	mm	172.8	
	内対面幅	mm	162.8	
	肉厚	mm	5.0	
集合体	燃料ピン本数(炉心/軸ブランケット) *	-	169 / 147	
	燃料ピンピッチ	mm	12.3	
	集合体間ギャップ	mm	4.0	
	集合体配列ピッチ	mm	176.8	
	Naプレナム厚さ	mm	400	
	体積比	燃料 (実効)	%	46.5 (38.1)
		構造材	%	25.3
冷却材(ラップ管内/外)		%	23.7 / 4.5	
炉心等価直径 / 選定体外径	m	3.2 / 4.4		

\*: 下部軸ブランケットは溶解燃料排出孔として6cm径と等価面積相当分の燃料ピンからペレットを削除

## 表 2.1b 高転換型中型炉 Fsm100 炉心・燃料仕様 炉心長 1m、比出力密度 43.1(kW/kg-MOX)、ボイドワース 5.7%

表 2 Na冷却中型酸化物燃料炉心の燃焼特性解析結果  
(750MWe、高内部転換型選定炉心、ABLE型燃料集合体)

Pu富化度[Pu/(Pu+U):内側/外側](wt%)	19.3 / 23.0	
運転サイクル長さ(日)	791 [約26ヶ月]	
燃料交換バッチ数(バッチ)	4	
取出平均燃焼度 [内側/外側/平均](GWd/t)	168 / 126 / 149	
実効平均燃焼度[軸ブラ含む](GWd/t)	101	
燃焼反応度(% $\Delta$ k/kk')	2.91	
増殖比(-) [炉心/合計]	平衡初期	0.834 / 1.044
	平衡末期	0.809 / 1.031
	平均	0.822 / 1.038
炉心平均出力密度(W/cc)[平衡中期]	156	
炉心平均比出力密度(kW/kg-MOX)[平衡中期]	40.8	
炉心平均比出力密度(kW/kg-HM)[平衡中期]	46.3	
炉心部平均線出力(W/cm)[平衡中期]	234	
最大線出力(W/cm) *1 [内側/外側]	平衡初期	412/417
	平衡末期	382/358
出力分担率(%) [内側/外側/軸ブラケット]	平衡初期	58.6 / 37.1 / 4.3
	平衡末期	58.3 / 35.1 / 6.6
ピーク高速中性子束[平衡中期]( $\times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s)	2.01	
ピーク高速中性子フルエンス[内側/外側] ( $\times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup> ) *2	5.49 / 4.21	
初装荷核分裂性Pu重量(t/GWe)	6.0	
炉心部ドブラー係数[平衡末期]( $\times 10^{-3}$ Tdk/dt) *3	-6.1	
炉心部ボイド反応度[平衡末期](%) *4	5.6	

\*1 3次元解析評価値(平衡初期の制御棒中挿入も考慮)  
 \*2 最大高速中性子束(MOEC)  $\times$  運転サイクル長さ  $\times$  バッチ数  $\times$  24h  $\times$  3600s  
 \*3 均質セル計算による評価値(炉心部温度を+500°C) 非均質効果=1.05  
 \*4 ラッパー管内側のみボイド化、 $\beta = 0.003334$ 、非均質効果=0.9

表 1 高内部転換型中型均質炉心(75kWe炉心)の選定炉心の燃料仕様

	選定炉心燃料仕様
炉心有効長(mm)	1,000
軸ブラ厚さ(mm)[上部/下部]	300/300
集合体当りピン本数(本)[炉心部/軸ブラ部]	217/180
ピン外径(mm)	10.4
ピン内径(mm)	8.98
被覆管肉厚(mm)	0.71
ベレットスミア密度(%TD)[炉心部/軸ブラ部]	82/91
ワイヤ径(mm)	1.05
ピン配列ピッチ(mm)	11.51
ワイヤ巻ピッチ(mm)	200
集合体配列ピッチ(mm)	186.1
ダクト外対面間距離(mm)	182.1
ダクト内対面間距離(mm)	172.1
ダクト肉厚(mm)	5.0
Porosity/Ring	0.1049
燃料体積比(%)[ピン内径定義、炉心部]	45.8
燃料体積比(%)[集合体内実効、炉心部]	37.6
構造材体積比(%)	26.5
冷却材体積比(%)[ラッパー管内]	23.4
冷却材体積比(%)[ラッパー管外]	4.3
集合体数(体)	333
燃料ピン全長(mm)	2,630
集合体最大流量(kg/s)[概算]	30
圧力損失(MPa)	約0.2

\*1 一次系全流量の90%を炉心に配分して出力ピーキングが従来炉心並みと想定した。  
 集合体最大流量[kg/s]=9.083  $\times$  0.9 / 集合体数  $\times$  1.2

## 表 2.1c 高転換型中型炉 Fsm80 炉心・燃料仕様 炉心長 0.8m、比出力密度 43.8kW/kg-MOX、ボイドワース 4.8%

表 3.2-1 高内部転換型中型均質炉心の燃焼特性解析結果  
[217本バンドル、炉心高さ:80cm、燃料集合体数:402体]

Pu富化度[Pu/(Pu+U):内側/外側](wt%)	21.1 / 25.3	
運転サイクル長さ(日)	791 [約26ヶ月]	
燃料交換/バッチ数(バッチ)	4	
取出平均燃焼度 [内側/外側/平均](GWd/t)	165 / 123 / 149	
実効平均燃焼度[軸ブラ含む](GWd/t)	94	
燃焼反応度(% $\Delta k/kk'$ )	3.31	
増殖比(-) [炉心/合計]	平衡初期	0.762 / 1.037
	平衡末期	0.745 / 1.032
	平均	0.754 / 1.035
炉心平均出力密度(W/cc)[平衡中期]	156	
炉心平均比出力密度(kW/kg-MOX)[平衡中期]	40.7	
炉心平均比出力密度(kW/kg-HM)[平衡中期]	47.0	
炉心部平均線出力(W/cm)[平衡中期]	237	
最大線出力(W/cm) *1 [内側/外側]	平衡初期	393 / 338
	平衡末期	367 / 310
出力分担率(%) [内側/外側/軸ブラケット]	平衡初期	63.5 / 30.6 / 5.9
	平衡末期	62.1 / 29.1 / 8.9
ピーク高速中性子束[平衡中期]( $\times 10^{15}n/cm^2s$ )	1.89	
ピーク高速中性子フルエンス[内側/外側] ( $\times 10^{23}n/cm^2$ ) *2	5.15 / 3.74	
初装荷核分裂性Pu重量(t/GWe)	6.4	

\*1 2次元解析評価値(燃焼ミスマッチ考慮)

\*2 最大高速中性子束(MOEC)  $\times$  運転サイクル長さ  $\times$  バッチ数  $\times 24h \times 3600s$

表 3.1-1 高内部転換型中型均質炉心における選定炉心(高さ80cm)の燃料仕様

	選定炉心燃料仕様 (高さ80cm炉心)
炉心有効長(mm)	800
軸ブラ厚さ(mm)[上部/下部]	300/300
集合体当たりピン本数(本)[炉心部/軸ブラ部]	217/180
ピン外径(mm)	10.5
ピン内径(mm)	9.06
被覆管肉厚(mm)	0.72
ペレットスミア密度(%TD)[炉心部/軸ブラ部]	82/91
ワイヤ径(mm)	1.00
ピン配列ピッチ(mm)	11.56
ワイヤ巻ピッチ(mm)	200
集合体配列ピッチ(mm)	186.7
ダクト外対面間距離(mm)	182.7
ダクト内対面間距離(mm)	172.7
ダクト肉厚(mm)	5.0
Porosity/Ring	0.0946
燃料体積比(%) [ピン内径定義、炉心部]	46.3
燃料体積比(%) [集合体内実効、炉心部]	38.0
構造材体積比(%)	26.7
冷却材体積比(%) [ラッパ管内]	22.8
冷却材体積比(%) [ラッパ管外]	4.2
集合体数(体)	402
燃料ピン全長(mm)	2,430
集合体最大流量(kg/s)[概算]	25
燃料バンドル部圧力損失(MPa)	約0.15

\*1 1次系全流量の90%を炉心に配分して出力ピーキングが従来炉心並みと想定した。  
集合体最大流量(kg/s) =  $9,083 \times 0.9 / \text{集合体数} \times 1.2$

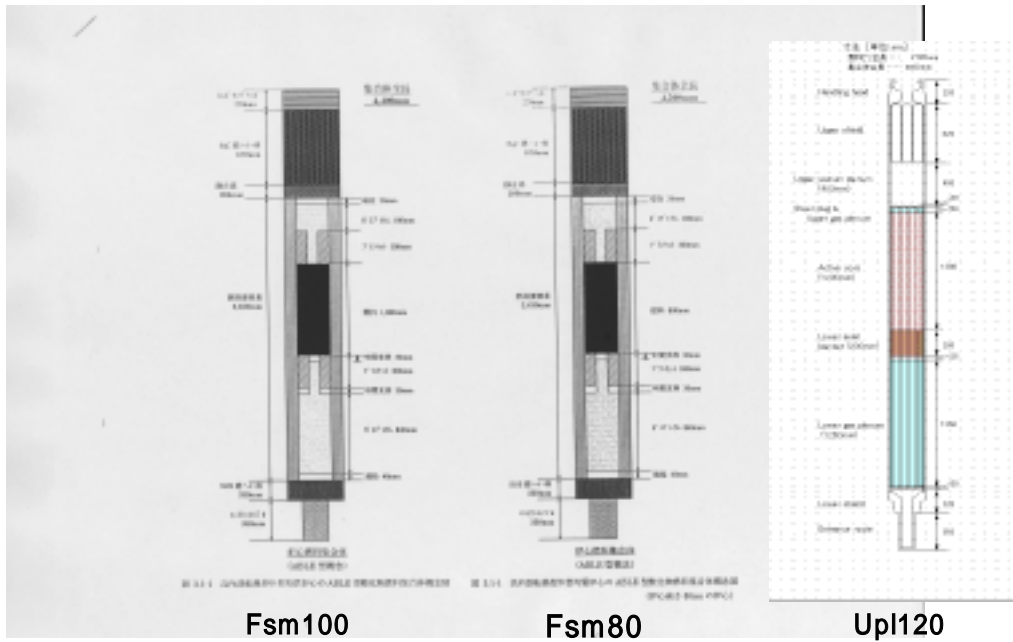


图 2.1 Fsm100/Fsm80/UPL120炉心燃料集合体概念图

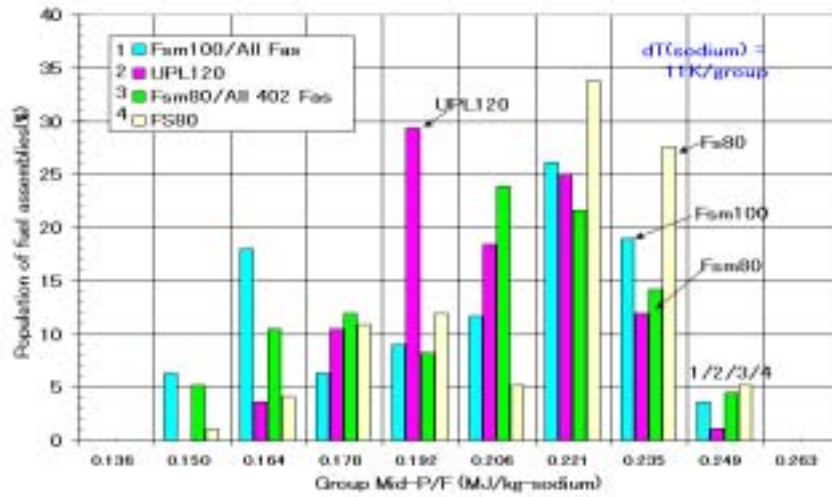


Fig.2.2 Comparison of Power-to-Flow (P/F) population

图2.2 出力 / 流量比(P/F)分布比较  
Fsm100/Fsm80/UPL120/Fs80

表 2.2 断熱条件下で固相融点の燃料を溶融するのに必要な投入エネルギーの比較

炉 心	平均比出力密度 (kW/kg-MOX)	燃料ピン線質量 (g/cm)	固相融点下の 1kg の燃料溶融に必要な投入エネルギー (fps)(注)	燃料ピン局所崩 壊に必要な投入 エネルギー (fps) の相対値
Fs80	65.3	4.1	4.1	1.0
Fs120	53.1	5.1	5.0	1.5
UPL120	31.5	6.7	8.4	3.4
Fsm100	43.1	5.7	6.1	2.1
Fsm80	43.8	5.8	6.0	2.1

(注) fps (full-power-second)、MOX 燃料溶融潜熱= 2.67E5 J/kg

料破損判定モデルは、被覆管肉厚中心温度がその固相融点の 200K 以内に達した軸方向ノードでは、照射済み燃料では燃料ミートの質量溶融割合が 20%を超えると、そのノードは破損する。質量溶融割合 20%という数値は表 2.5 には無く、現在の SAS4A (Version Ref01R2p)はこの値をコード内で計算しており、照射済み燃料ピン(燃料ミート内に FP ガスを含む燃料)では最低 20%となる。被覆管肉厚中心温度が固相融点の 200K 以内に達していない軸方向ノードでは、被覆管周応力が破断応力を超え、かつ、燃料ミートの質量溶融割合が 20%を超えると破損する。被覆管温度が高い場合の破損は冷却材がボイド化したチャンネルで燃料が崩壊型(Levitate 型)の破損となる場合に対応し、被覆管温度が低い場合の破損は、未・部分沸騰チャンネルの燃料が溶融キャビティ圧によりバースト型の破損(Pluto2 type failure: Pluto2 は SAS4A コードの中で冷却材が未沸騰または部分沸騰中で、ボイド率が 70%以下の集合体内の燃料破損を扱うモデルの名称)となる場合に対応している。



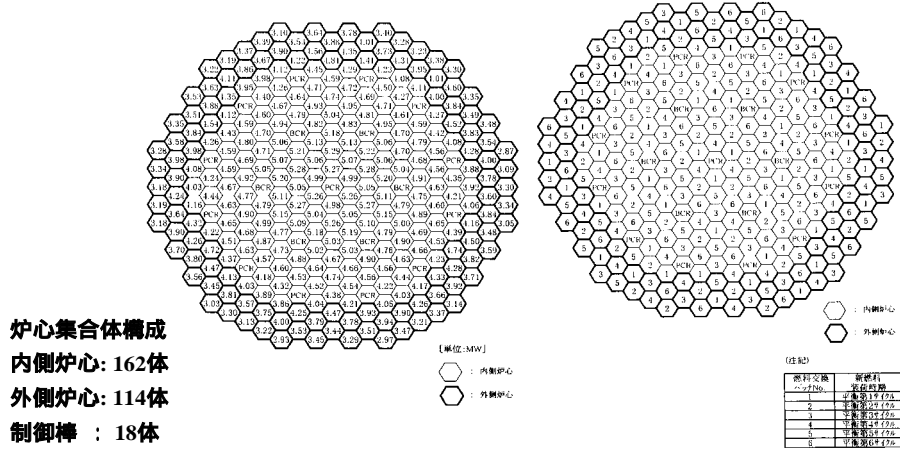


図 3.2.2.1-29 炉心集合体出力分布 (平衡炉心/第6サイクル末期)

図 3.2.2.1-17 燃料交換パターン

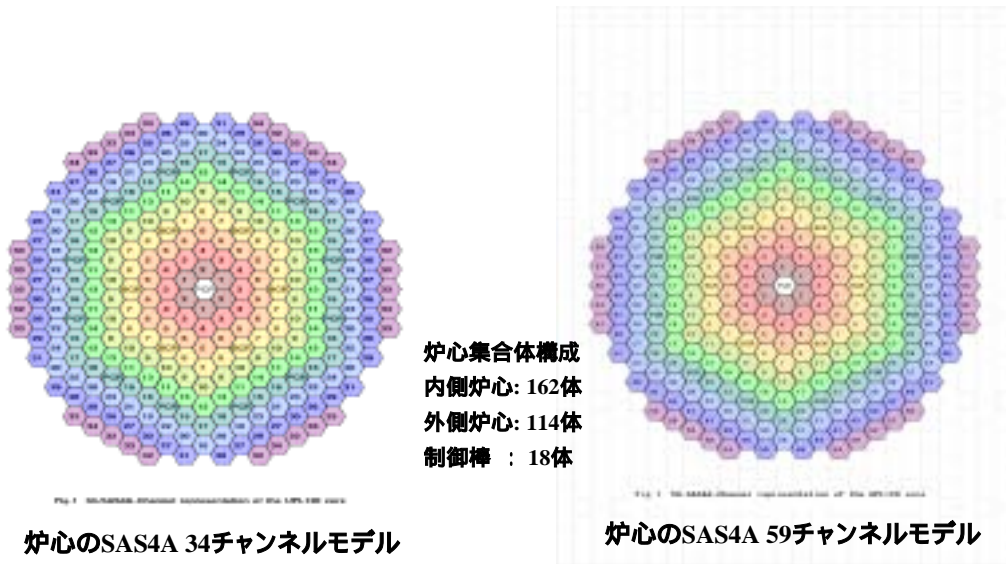
**燃料集合体出力分布(EOEC)**

**集合体燃料交換バッチ番号**

3.2.2.1-57

3.2.2.1-55

**図2.3a UPL120炉心燃料集合体出力分布**



**図2.3b SAS4AチャンネルによるUPL120炉心のモデル化**

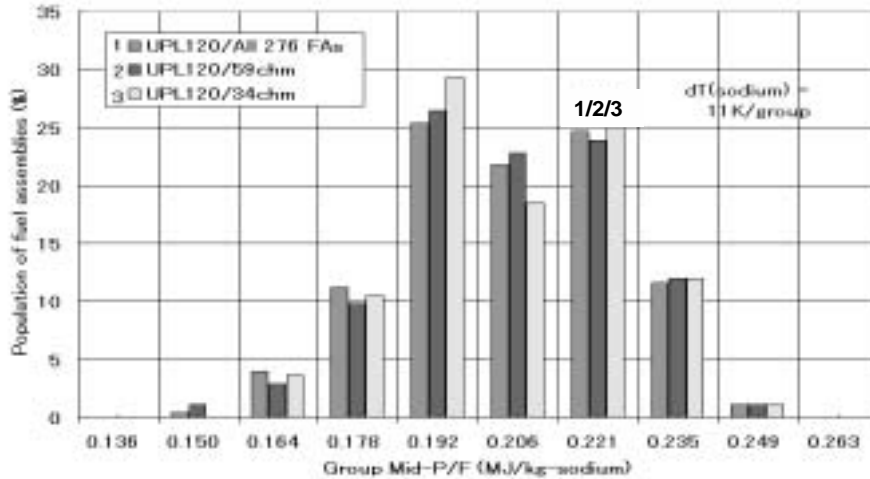


図2.3c UPL120炉心の燃料集集体出力 / 流量比(P/F)分布 - チャンネルモデル依存性

表 2.3a 高転換型中型炉 UPL120 炉心 34 チャンネルの初期定常特性

Table 1a Steady-state characteristics of 34 channels of UPL120 core/Case 94%TD fuel/Post-Correction 94%TD Pellet (Ref01R2-Pre)

SAS Ch #	Core Zone	Hex Layer #	Av. Residence Cycles 710 days/cycle	No. of FAs/ch	Peak Power (W/cm)	Power (MW/ch)	Flow (kg/s/FA)	Flow (kt/s/pin)	P/F (MJ/kg)	Peak Burnup (at.%)	Core Clad/Wire Worth (\$)	Core Fuel Worth (\$)	Core Void Worth (\$)	Fuel Pin Temperature ( )						Fractional FP-gas Release(-)	Plenum Gas Pressure (MPa)	Retaind FP-gas in Solid Fuel (1.0E-4kg)
														Pellet (Peak Pw)		Mid-cladding		Coolant				
Ch					l/hgr			169 pins/FA		P Bu			Void/Up	center/	surface/Buc	max/Buc	at peak	Exit/Bu	lgr/Buc	Ppl/Buc	rfrg/Buc	
1	IC	2	2	3	315	5.40	22	1.302E-01	0.245	8.0	-0.24	1287	0.111	0.037	1518	700	595	507	590	0.618	2.1	26.6
2	IC	2	5	3	303	5.19	22	1.302E-01	0.236	19.2	-0.24	1287	0.111	0.037	1672	727	588	503	582	0.821	6.1	30.1
3	IC	3	1	6	309	5.30	22	1.302E-01	0.241	3.9	-0.483	2593	0.227	0.038	1432	677	592	522	586	0.597	1.1	13.8
4	IC	3	4	6	301	5.17	22	1.302E-01	0.235	15.3	-0.483	2593	0.227	0.038	1630	733	587	519	581	0.77	4.6	30.7
5	IC	4	6	9	284	4.88	22	1.302E-01	0.222	21.6	-0.668	3611	0.309	0.034	1646	718	576	486	571	0.834	7.0	31.4
6	IC	4	3	9	300	5.14	22	1.302E-01	0.234	11.4	-0.668	3611	0.309	0.034	1541	707	586	501	580	0.691	3.2	30.8
7	IC	5	2	9	294	5.04	22	1.302E-01	0.229	7.5	-0.619	3303	0.281	0.031	1429	676	582	500	577	0.568	1.8	28.1
8	IC	5	5	9	283	4.86	22	1.302E-01	0.221	17.9	-0.619	3303	0.281	0.031	1589	711	575	486	570	0.795	5.6	32.1
9	IC	6	1	15	283	4.84	22	1.302E-01	0.220	3.6	-0.987	5344	0.459	0.031	1407	702	575	511	569	0.601	1.0	12.5
10	IC	6	4	15	279	4.78	22	1.302E-01	0.217	14.1	-0.987	5344	0.459	0.031	1520	711	572	510	567	0.729	4.1	33.4
11	IC	7	6	12	258	4.42	22	1.302E-01	0.201	19.6	-0.881	3787	0.313	0.026	1507	688	558	487	554	0.739	6.1	34.4
12	IC	7	6	6	250	4.29	22	1.302E-01	0.195	19.0	-0.841	1893	0.157	0.026	1465	687	554	484	548	0.787	5.8	35.4
13	IC	7	3	9	270	4.62	22	1.302E-01	0.210	10.2	-0.511	2.84	0.235	0.026	1404	673	567	491	562	0.62	2.6	34.0
14	IC	7	3	9	267	4.57	22	1.302E-01	0.208	10.1	-0.511	2.84	0.235	0.026	1355	669	565	490	560	0.612	2.5	34.3
15	IC	8	2	12	255	4.36	22	1.302E-01	0.198	6.4	-0.581	3186	0.257	0.021	1239	633	557	486	552	0.5	1.4	28.1
16	IC	8	5	12	249	4.26	22	1.302E-01	0.194	15.7	-0.581	3186	0.257	0.021	1409	677	553	483	548	0.735	4.6	36.4
17	OC	8	4	6	281	4.37	20.5	1.213E-01	0.213	13.2	-0.224	1.75	0.102	0.017	1412	692	569	503	564	0.705	3.6	33.3
18	OC	9	2	6	256	4.28	20.5	1.213E-01	0.209	6.5	-0.161	1.467	0.073	0.012	1259	648	565	501	560	0.513	1.4	26.9
19	OC	9	2	3	242	4.14	22	1.302E-01	0.188	6.1	-0.38	0.755	0.062	0.021	1185	616	549	481	544	0.461	1.3	28.8
20	OC	9	1	12	264	4.42	20.5	1.213E-01	0.216	3.3	-0.386	3.218	0.175	0.015	1514	835	571	505	566	0.628	1.0	10.6
21	IC	9	1	6	240	4.10	22	1.302E-01	0.187	3.0	-0.276	1.51	0.125	0.021	1395	772	547	480	543	0.549	0.9	11.9
22	OC	9	5.5	6	242	4.06	20.5	1.213E-01	0.198	16.8	-0.224	1.75	0.102	0.017	1411	684	557	486	552	0.766	4.9	33.7
23	IC	9	4.33	9	236	4.04	22	1.302E-01	0.184	12.9	-0.414	2.264	0.187	0.021	1349	678	545	479	540	0.656	3.4	38.8
24	OC	9	5	3	230	3.86	20.5	1.213E-01	0.188	14.6	-0.112	0.875	0.051	0.017	1354	681	549	491	544	0.709	4.0	36.2
25	OC	9	3	3	251	4.20	20.5	1.213E-01	0.205	9.5	-0.112	0.875	0.051	0.017	1305	661	562	499	557	0.578	2.2	34.3
26	OC	10	2	9	238	3.98	18.6	1.101E-01	0.214	6.0	-0.273	2.342	0.124	0.014	1193	631	569	502	565	0.472	1.3	27.1
27	OC	10	6	12	214	3.58	18.6	1.101E-01	0.193	16.2	-0.323	2.935	0.146	0.012	1300	671	552	491	548	0.732	4.6	37.1
28	OC	10	5	6	211	3.53	18.6	1.101E-01	0.190	13.3	-0.161	1.467	0.073	0.012	1232	653	549	490	545	0.657	3.4	39.1
29	OC	10	4	9	213	3.57	18.6	1.101E-01	0.192	10.8	-0.211	2.06	0.095	0.011	1186	639	551	491	547	0.667	2.4	39.8
30	OC	10	3	6	235	3.84	18.6	1.101E-01	0.212	8.9	-0.224	1.75	0.102	0.017	1266	657	567	501	563	0.534	2.0	35.5
31	OC	10	3	6	207	3.46	18.6	1.101E-01	0.186	7.8	-0.098	1.185	0.044	0.007	1096	609	546	488	542	0.436	1.5	37.7
32	OC	11	1.33	12	203	3.40	18.6	1.101E-01	0.183	3.4	-0.197	2.369	0.088	0.007	1202	706	544	487	540	0.477	0.8	15.3
33	OC	11	5.3	10	185	3.09	18.6	1.101E-01	0.166	12.3	-0.164	1.974	0.073	0.007	1086	619	530	478	526	0.591	2.9	43.1
34	OC	11	3.5	8	191	3.19	18.6	1.101E-01	0.171	8.4	-0.131	1.579	0.059	0.007	1038	597	534	481	531	0.428	1.5	41.1

[276]

Worth Sum=	-13.03	82.13	5.96
(in \$)	Adop	-6.85E-03	5.993
	Bdop	-5.12E-03	

(Overall core void worth)  
(Positive void worth sum)

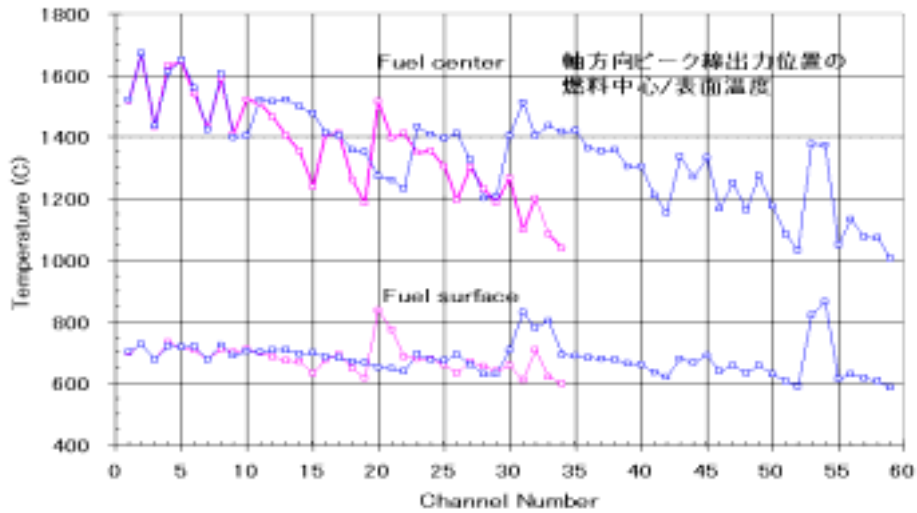


Fig 1 Initial fuel temperature at peak power node: UPL120/34 & 59 channel models

図 2.3d UPL120炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 SAS4A Ch.34 vs. Ch.59 of UPL120

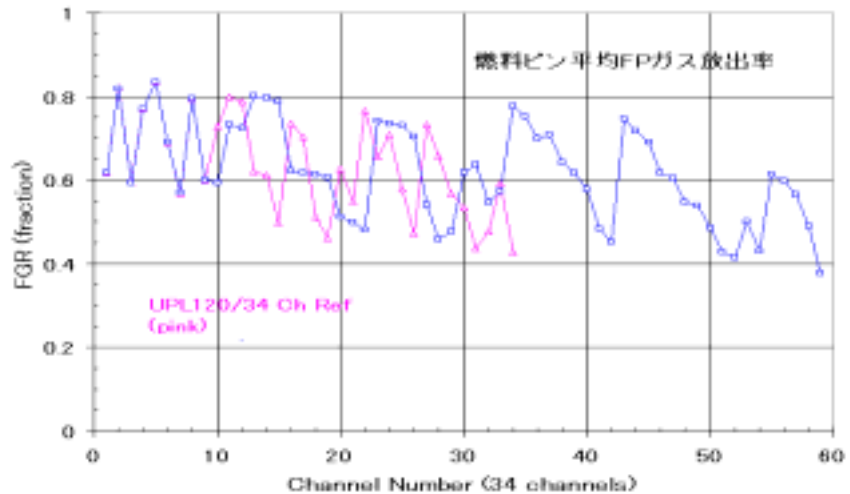


Fig 2 Fission gas release fraction of fuel pins during pre-irradiation: UPL120 59 & 34 channel models

図 2.3e UPL120炉心前照射期間中の燃料ピンFPガス放出率 SAS4A Ch.34 vs. Ch.59 of UPL120

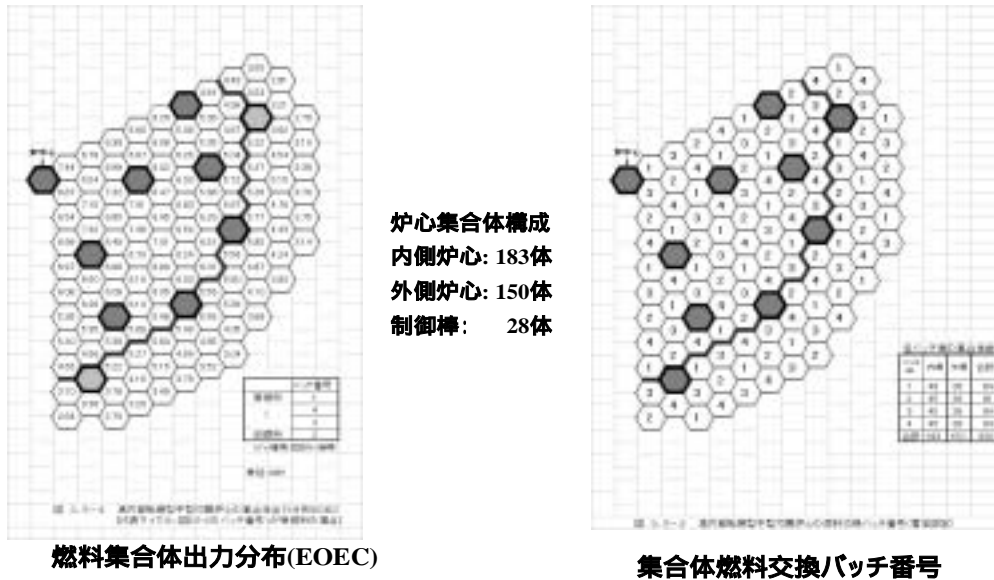


図2.4a Fsm100炉心燃料集合体出力分布

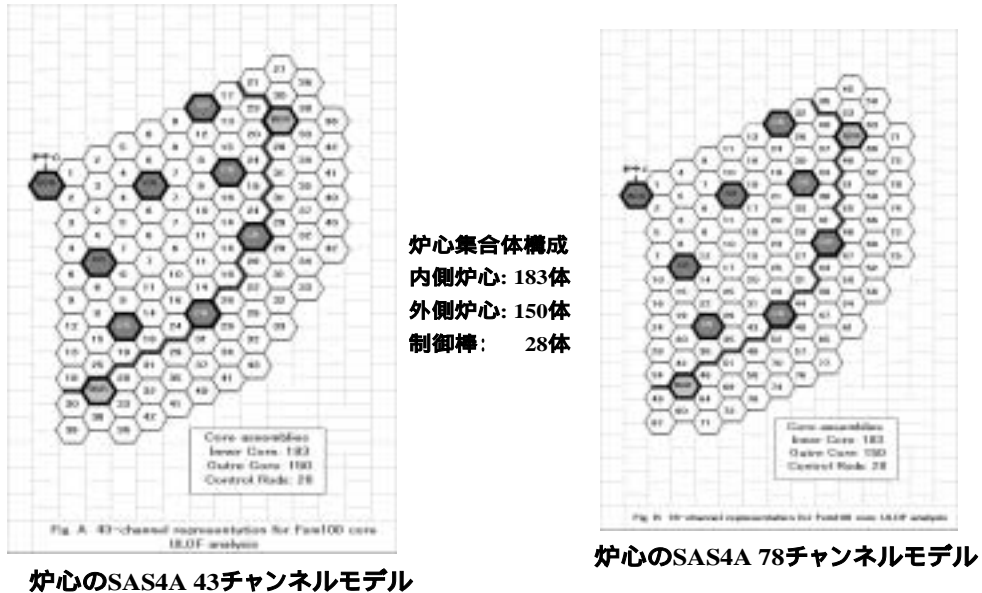


図2.4b Fsm100炉心SAS4Aチャンネルによる炉心のモデル化

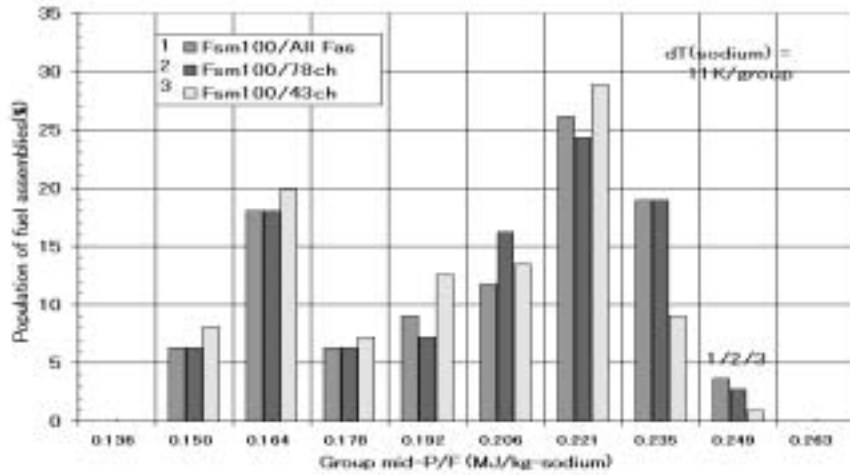


Fig B P/F population of Fsm100 core: Channel lumping effect

図2.4c Fsm100炉心の燃料集集体出力 / 流量比(P/F)分布  
チャンネルモデル依存性

表 2.3b 高転換型中型炉 Fsm100 炉心 43 チャンネルの初期定常特性

Table 1a Steady-state characteristics of Rev. 43 channels of Fsm100 core/EDEC (F890 base mat pro model)

Notes: nvt 1a ok. (Ref1012-modfzk(Dec.02))

SAS Ch #	Core Zone	Hex Layer #	Av. Residence Cycles	No. of Fw/Ch	Peak Power (Mw)	Power (Mw)	Flow (kg/s)	Flow (kg/s/pin)	P/F (MJ/kg)	Peak Burnup (at.%)	Core Clad North (S)	Core Fuel North (S)	Core Void North (S)	Fuel Pin Temperature ( )				Fractional Release(-)	Plenum Gas Pressure (MPa)	Retained FP-gas in Solid Fuel (1.0E-4kg)		
														Pellet (Peak Pe)	Mid-cladding	Coilant	Void/Fa					
Fsm100/43ch	Core Zone	Layer #	Nsub	l/hor	Flow (kg/s)	Flow (kg/s/pin)	P Bu	clad	fuel	void/Fsm100	F1 Temp/43	F2 Temp/43	43C Mid-Temp	C P Temp/43	C E Temp/43	FG Rate/43	FG Pres/43	FG Miss/43ch/R				
1	IC	2	1000	3	365	7.44	30.24	1.3935E-01	0.246	8.1	-0.233	1.391	0.101	3.387E-02	1638	726	596	521	590	0.601	1.30	16.59
2	IC	3	2667	9	341	6.79	30.24	1.3935E-01	0.224	15.1	-0.703	4.176	0.305	3.389E-02	1738	761	583	513	577	0.771	3.66	23.72
3	IC	3	4000	6	321	6.54	30.24	1.3935E-01	0.216	21.4	-0.47	2.785	0.205	3.417E-02	1757	757	572	506	586	0.823	5.42	25.92
4	IC	4	1500	12	351	6.39	30.24	1.3935E-01	0.231	9.9	-0.333	5.026	0.357	2.975E-02	1659	739	585	516	583	0.658	1.92	20.53
5	IC	4	3500	6	325	6.38	30.24	1.3935E-01	0.211	18.9	-0.417	2.513	0.179	2.983E-02	1743	759	574	507	598	0.805	4.72	25.29
6	IC	6	1500	24	341	6.60	30.24	1.3935E-01	0.215	8.5	-1.287	7.665	0.55	2.292E-02	1608	726	583	513	577	0.64	1.82	20.91
7	IC	6	3600	15	316	6.02	30.24	1.3935E-01	0.199	18.9	-0.89	5.319	0.38	2.533E-02	1707	752	569	504	583	0.8	4.68	25.89
8	IC	7	1000	9	308	6.26	30.24	1.2489E-01	0.231	5.1	-0.5	3.018	0.211	2.344E-02	1406	691	583	511	578	0.609	1.14	13.68
9	IC	6	2750	12	302	6.08	30.24	1.2489E-01	0.224	13.5	-0.705	4.239	0.299	2.492E-02	1581	734	579	503	575	0.728	3.18	25.73
10	IC	7	1000	6	340	6.83	30.24	1.3935E-01	0.226	5.7	-0.333	2.012	0.141	2.350E-02	1533	702	582	512	576	0.599	1.22	15.51
11	IC	7	3667	9	310	6.16	30.24	1.3935E-01	0.204	18.9	-0.5	3.018	0.211	2.344E-02	1691	748	566	502	561	0.797	4.67	26.25
12	IC	7	4000	6	265	5.98	26	1.1521E-01	0.215	17.6	-0.333	2.012	0.141	2.350E-02	1503	722	569	502	586	0.78	4.16	28.90
13	IC	8	1500	6	281	5.20	22.55	1.0392E-01	0.239	8.5	-0.333	2.012	0.141	2.350E-02	1265	684	584	509	581	0.566	1.30	19.23
14	IC	8	1750	12	310	6.10	27.1	1.2489E-01	0.225	9.0	-0.619	3.789	0.258	2.150E-02	1508	712	584	512	579	0.631	1.89	22.76
15	IC	8	3000	6	264	5.35	26	1.1521E-01	0.214	13.1	-0.333	2.012	0.141	2.350E-02	1412	702	568	501	565	0.682	2.85	28.57
16	IC	8	3333	9	291	5.89	27.1	1.2489E-01	0.210	16.1	-0.476	2.9	0.199	2.211E-02	1576	734	573	505	588	0.756	3.80	26.94
17	IC	8	4000	3	228	4.61	22.55	1.0392E-01	0.204	15.1	-0.143	0.888	0.059	1.987E-02	1336	686	559	494	557	0.603	3.28	31.71
18	IC	9	1000	3	229	4.83	20.12	9.2719E-02	0.230	3.8	-0.143	0.888	0.059	1.987E-02	1408	824	579	505	578	0.62	0.92	9.86
19	IC	9	1667	9	279	5.39	26	1.1521E-01	0.216	7.7	-0.428	2.665	0.176	1.956E-02	1364	687	579	507	575	0.579	1.54	22.24
20	IC	9	2000	3	241	4.67	22.55	1.0392E-01	0.216	8.0	-0.143	0.888	0.059	1.987E-02	1235	655	569	500	566	0.538	1.48	25.21
21	OC	9	2000	3	226	4.43	22.54	1.0392E-01	0.196	7.5	-0.131	0.807	0.053	1.787E-02	1169	630	554	488	551	0.51	1.30	24.30
22	OC	9	2000	3	285	5.90	30.24	1.3935E-01	0.192	9.8	-0.131	0.807	0.053	1.787E-02	1458	701	553	493	547	0.639	2.00	23.45
23	IC	9	3000	3	215	4.36	20.12	9.2719E-02	0.217	10.7	-0.143	0.888	0.059	1.987E-02	1202	655	568	498	567	0.574	2.02	31.18
24	IC	9	3667	9	266	5.04	26	1.1521E-01	0.202	16.2	-0.428	2.665	0.176	1.956E-02	1481	718	570	502	566	0.741	3.75	28.72
25	IC	9	4000	3	225	4.66	22.55	1.0392E-01	0.202	14.9	-0.143	0.888	0.059	1.987E-02	1317	682	558	493	535	0.688	3.23	31.89
26	OC	9	4000	6	282	5.56	30.24	1.3935E-01	0.184	18.8	-0.262	1.814	0.106	1.787E-02	1577	726	547	488	541	0.798	4.47	25.35
27	OC	10	1000	3	181	3.65	20.12	9.2719E-02	0.176	3.0	-0.057	0.614	0.02	6.667E-03	1378	906	537	478	535	0.455	0.62	10.83
28	OC	10	1000	6	266	5.22	26	1.1521E-01	0.209	4.4	-0.262	1.814	0.106	1.787E-02	1327	707	565	497	561	0.638	1.03	10.56
29	OC	10	1600	15	289	5.39	27.1	1.2489E-01	0.199	7.7	-0.533	4.294	0.203	1.353E-02	1387	686	566	499	561	0.594	1.52	20.59
30	OC	10	3500	6	185	3.63	22.54	1.0392E-01	0.157	10.7	-0.143	0.888	0.059	1.987E-02	1045	611	526	472	522	0.336	1.84	32.87
31	OC	10	3200	15	266	4.67	27.1	1.2489E-01	0.180	14.1	-0.533	4.294	0.203	1.353E-02	1431	700	553	481	548	0.715	3.09	26.87
32	OC	11	3750	12	212	4.05	26	1.1521E-01	0.162	13.2	-0.228	2.458	0.081	6.750E-03	1214	649	531	474	527	0.643	2.62	31.19
33	OC	11	2500	12	190	3.62	22.54	1.0392E-01	0.161	7.9	-0.135	1.988	0.042	3.500E-03	1017	595	529	474	526	0.447	1.22	28.78
34	OC	11	1667	9	233	4.24	26	1.1521E-01	0.169	6.4	-0.171	1.843	0.061	6.778E-03	1178	637	544	485	540	0.528	1.19	20.14
35	OC	11	1000	6	262	5.15	27.1	1.2489E-01	0.189	4.4	-0.114	1.229	0.041	6.833E-03	1331	715	551	490	546	0.633	1.01	10.59
36	OC	12	1333	9	142	2.76	16.73	7.7079E-02	0.165	3.1	-0.031	1.133	0.003	3.333E-04	1146	808	527	471	526	0.275	0.47	15.00
37	OC	11	3500	6	237	4.66	27.1	1.2489E-01	0.168	13.8	-0.114	1.229	0.041	6.833E-03	1324	870	536	480	531	0.681	2.88	29.13
38	OC	11	2500	6	168	3.21	20.12	9.2719E-02	0.180	6.9	-0.114	1.229	0.041	6.833E-03	926	576	527	472	524	0.471	1.03	27.14
39	OC	11	4000	3	136	2.64	16.73	7.7079E-02	0.158	9.9	-0.01	0.378	0.001	3.333E-04	844	566	521	467	520	0.437	1.32	33.26
40	OC	12	1667	9	192	3.75	22.54	1.0392E-01	0.167	5.3	-0.031	1.133	0.003	3.333E-04	1030	618	530	475	527	0.477	0.94	18.34
41	OC	12	3333	9	177	3.38	22.54	1.0392E-01	0.150	9.8	-0.031	1.133	0.003	3.333E-04	996	596	520	469	517	0.491	1.57	32.90
42	OC	12	2667	9	161	3.10	20.12	9.2719E-02	0.154	7.1	-0.031	1.133	0.003	3.333E-04	902	571	521	469	519	0.4	1.02	28.21
43	OC	12	4000	3	156	3.04	20.12	9.2719E-02	0.151	10.3	-0.01	0.378	0.001	3.333E-04	926	586	517	468	515	0.501	1.67	33.98

North Sum: -13.73, 94.58, 5.64  
(in S) Adop: -5.42E-03 Core Dop: 5.70E+00 (Positive void worth sum)  
Bdop: -4.30E-03 Core Dop:

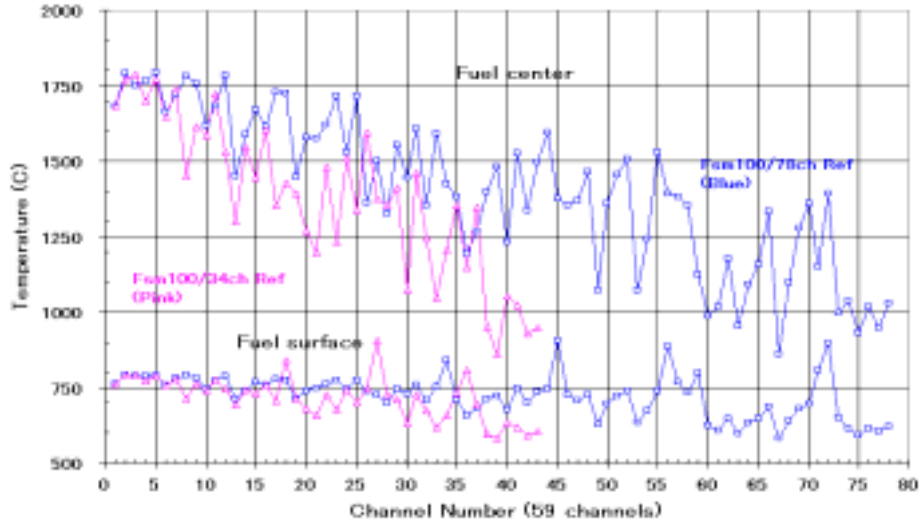


Fig.1 Initial fuel temperature at peak power node: Fsm100/78ch & 43ch models

図 2.4d Fsm100炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 SAS4A Ch.43 vs. Ch.78 of Fsm100

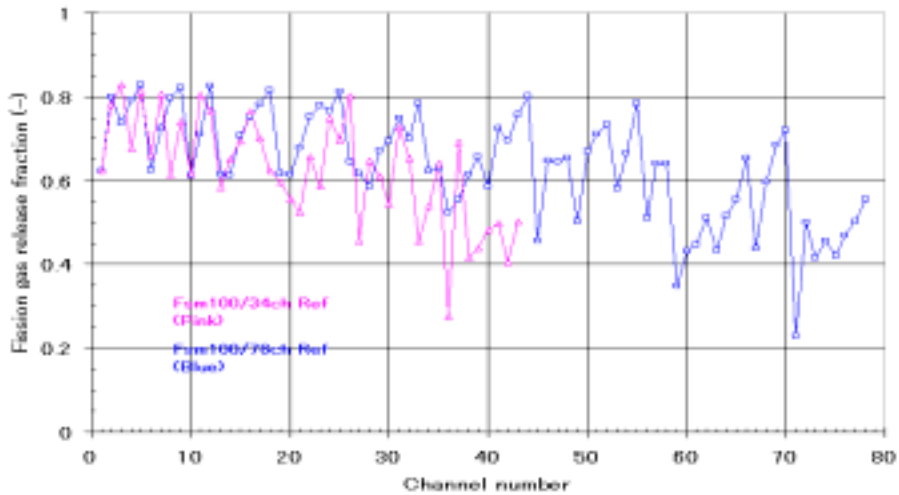


Fig.3 Fission gas release of fuel pins during pre-irradiation: Fsm100 78ch & 43ch models

図 2.4e Fsm100炉心前照射期間中の燃料ピンFPガス放出率 SAS4A Ch.43 vs. Ch.78 of Fsm100

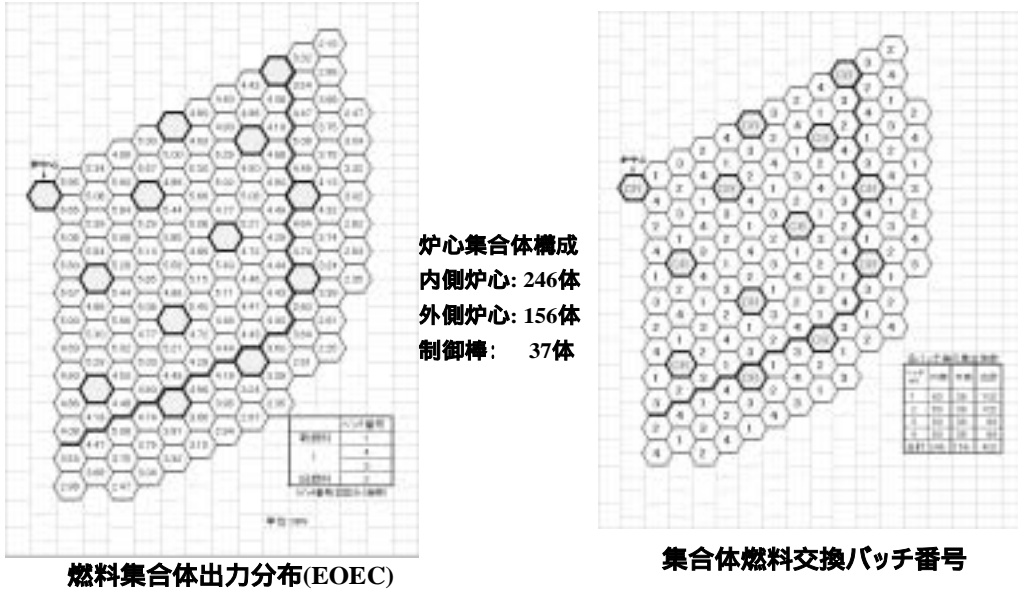


図2.5a Fsm80炉心燃料集合体出力分布

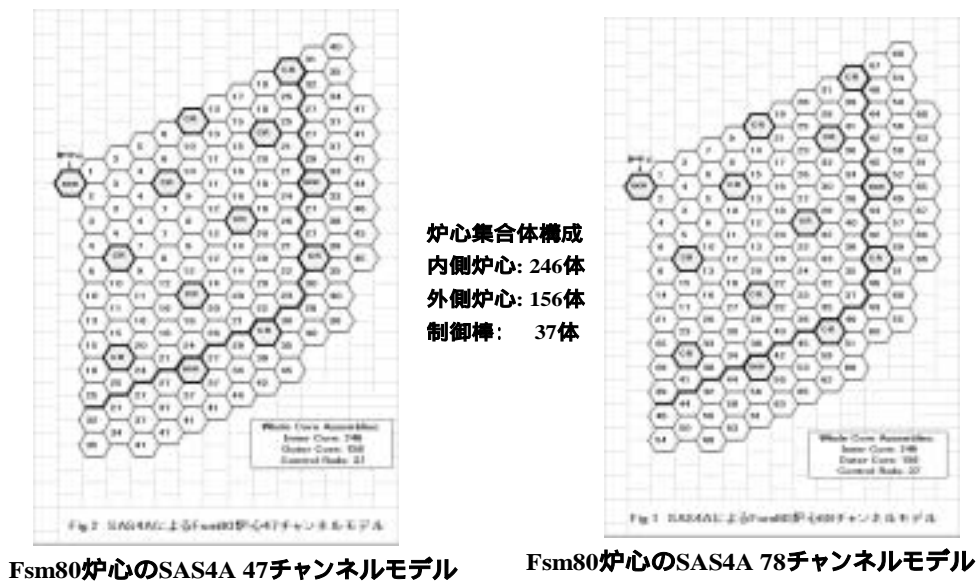


図2.5b SAS4AチャンネルによるFsm80炉心のモデル化

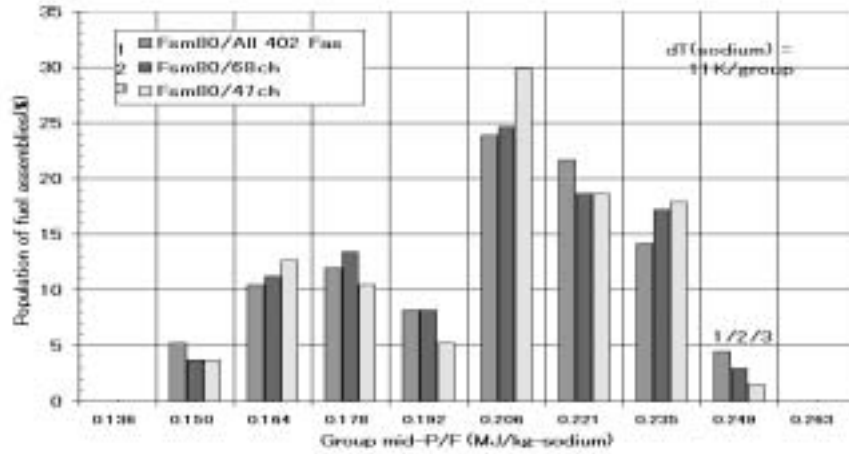


Fig.C P/F population of Fam80 core: Channel lumping effect

図2.5c Fsm80炉心の燃料集合体出力 / 流量比(P/F)分布  
チャンネルモデル依存性

表 2.3c 高転換型中型炉 Fsm80 炉心 47 チャンネルの初期定常特性

Table 1a Steady-state characteristics of 47 channels of Fam80 core/EDEC (F880 base mat prod model)

SAS Ch #	Core Zone	Hex Layer #	Av. Residence Cycles	No. of FAs/ch	Peak Power (W/cm)	Power (MW)	Flow (kg/s)	Flow (kg/e/pin)	P/F (M/kg)	Peak Burnup (at.%)	Core Clad North (S)	Core Fuel North (S)	Core Void North (S)	Void\$/FA	Fuel Pin Temperature ( )				Fractional FP-gas Release(-)	Plenum Gas Pressure (MPa)	Retained FP-gas in Solid Fuel (1.0E-4kg)	
															F.Temp/47	F.O.Temp/47	C.M.Temp/47	C.P.Temp/47				
1	IC	2	1.00	3	349	5.95	25.97	1.1968E-01	0.229	5.7	-0.177	1.176	0.072	2.400E-02	1568	731	582	515	577	0.594	1.69	15.53
2	IC	2	2.00	3	331	5.85	25.87	1.1968E-01	0.217	10.8	-0.177	1.176	0.072	2.400E-02	1651	756	573	507	567	0.686	3.44	19.87
3	IC	3	3.50	12	306	5.22	25.87	1.1968E-01	0.201	17.5	-0.723	4.759	0.295	2.458E-02	1674	759	560	499	554	0.774	6.13	23.10
4	IC	4	1.50	15	335	5.71	25.87	1.1968E-01	0.220	6.8	-0.8	5.358	0.323	2.153E-02	1615	743	575	509	569	0.641	2.66	18.35
5	IC	4	4.00	3	292	4.99	23.8	1.0876E-01	0.211	19.1	-0.16	1.072	0.095	2.167E-02	1648	759	587	502	582	0.784	8.76	24.08
6	IC	5	1.33	9	325	5.55	23.6	1.0876E-01	0.235	7.1	-0.454	3.003	0.183	2.033E-02	1550	730	586	514	581	0.604	2.08	16.37
7	IC	5	3.33	9	307	5.24	23.6	1.0876E-01	0.222	16.7	-0.454	3.003	0.183	2.033E-02	1688	762	575	507	571	0.769	5.82	22.57
8	IC	6	1.00	6	343	5.85	23.6	1.0876E-01	0.248	5.6	-0.271	1.637	0.108	1.800E-02	1582	734	596	521	592	0.597	1.68	13.19
9	IC	6	2.00	9	321	5.49	23.6	1.0876E-01	0.232	10.5	-0.438	2.92	0.176	1.996E-02	1613	751	584	513	578	0.616	3.30	19.91
10	IC	6	3.50	12	289	4.93	23.6	1.0876E-01	0.209	16.5	-0.573	3.839	0.23	1.917E-02	1597	752	565	501	560	0.755	5.65	23.66
11	IC	7	1.50	12	321	5.48	23.6	1.0876E-01	0.232	7.9	-0.541	3.673	0.215	1.792E-02	1548	732	584	513	578	0.614	2.32	17.73
12	IC	7	3.40	15	294	5.01	23.6	1.0876E-01	0.212	16.3	-0.667	4.457	0.259	1.727E-02	1609	754	567	502	582	0.725	5.58	23.31
13	IC	7	3.87	9	275	4.68	21.46	9.8886E-02	0.218	16.4	-0.391	2.921	0.151	1.678E-02	1544	745	571	503	568	0.746	5.56	23.37
14	IC	8	1.33	9	311	5.30	23.6	1.0876E-01	0.225	6.8	-0.348	2.353	0.13	1.444E-02	1478	714	578	509	573	0.589	1.95	16.26
15	IC	8	1.50	12	299	5.10	21.46	9.8886E-02	0.237	7.3	-0.464	3.137	0.173	1.442E-02	1455	721	586	513	583	0.593	2.10	17.40
16	IC	8	3.50	12	287	4.90	23.6	1.0876E-01	0.208	16.4	-0.464	3.137	0.173	1.442E-02	1593	753	564	500	559	0.752	5.59	23.76
17	IC	8	4.00	9	292	4.40	21.46	9.8886E-02	0.205	16.9	-0.116	0.784	0.043	1.433E-02	1478	727	560	497	557	0.739	5.64	25.73
18	IC	9	1.33	16	295	5.03	21.46	9.8886E-02	0.234	6.4	-0.664	4.528	0.249	1.383E-02	1417	710	584	512	581	0.687	1.86	15.50
19	IC	9	2.00	3	260	4.43	19.3	8.8940E-02	0.229	8.5	-0.1	0.695	0.038	1.267E-02	1320	693	579	507	577	0.573	2.32	21.12
20	IC	9	3.67	21	267	4.55	21.46	9.8886E-02	0.212	15.6	-0.731	5.045	0.276	1.314E-02	1495	734	586	500	562	0.727	5.13	24.82
21	IC	10	1.50	15	274	4.67	21.46	9.8886E-02	0.217	7.2	-0.495	3.476	0.19	1.267E-02	1343	690	570	503	567	0.567	1.97	19.11
22	IC	10	1.00	6	260	4.43	19.3	8.8940E-02	0.229	4.2	-0.2	1.39	0.076	1.267E-02	1373	754	579	507	577	0.638	1.40	8.97
23	IC	10	2.00	3	235	4.00	19.3	8.8940E-02	0.207	7.7	-0.11	0.695	0.038	1.267E-02	1231	663	561	496	559	0.527	1.96	21.19
24	IC	10	3.00	9	264	4.49	21.46	9.8886E-02	0.209	12.9	-0.299	2.086	0.114	1.267E-02	1429	717	584	499	581	0.675	3.99	24.51
25	IC	10	3.50	12	243	4.13	19.3	8.8940E-02	0.214	13.8	-0.399	2.781	0.192	1.267E-02	1382	708	567	499	565	0.619	4.29	28.00
26	IC	10	4.00	6	252	4.29	21.46	9.8886E-02	0.200	16.4	-0.2	1.39	0.076	1.267E-02	1448	719	556	495	553	0.728	5.43	26.14
27	OC	11	1.50	24	293	4.77	23.6	1.0876E-01	0.202	7.2	-0.637	5.922	0.223	9.292E-03	1411	703	561	497	555	0.596	1.98	16.18
28	OC	11	3.00	3	224	3.64	17.01	7.8387E-02	0.214	3.7	-0.16	1.496	0.096	6.000E-03	1402	828	567	496	565	0.618	1.16	7.77
29	OC	11	3.00	6	286	4.33	23.6	1.0876E-01	0.193	13.0	-0.13	1.496	0.096	9.333E-03	1428	709	546	487	540	0.693	3.94	22.25
30	OC	11	3.00	6	222	3.60	19.3	8.8940E-02	0.198	10.8	-0.156	1.433	0.054	9.000E-03	1231	664	546	485	543	0.592	2.85	24.59
31	OC	11	3.00	3	205	3.32	17.01	7.8387E-02	0.195	10.0	-0.055	0.606	0.018	6.000E-03	1153	649	552	488	550	0.552	2.45	25.08
32	OC	12	1.00	6	218	3.54	19.3	8.8940E-02	0.183	14.2	-0.156	1.433	0.054	9.000E-03	1282	681	544	484	540	0.679	4.18	25.42
33	OC	12	1.50	9	262	4.23	23.6	1.0876E-01	0.179	8.4	-0.11	1.211	0.036	6.000E-03	1328	659	526	475	521	0.663	3.54	24.84
34	OC	12	1.33	9	232	3.77	21.46	9.8886E-02	0.176	5.0	-0.165	1.817	0.055	6.111E-03	1231	688	538	482	534	0.575	1.42	11.95
35	OC	12	1.50	12	197	3.18	17.01	7.8387E-02	0.187	4.8	-0.137	1.969	0.041	3.417E-03	1125	679	546	484	543	0.522	1.25	12.77
36	OC	12	3.00	3	139	2.25	14.16	5.5253E-02	0.199	4.5	-0.013	0.379	0.002	6.667E-04	1110	794	521	468	521	0.309	0.80	17.37
37	OC	12	3.00	6	146	2.76	23.6	1.0876E-01	0.159	13.2	-0.13	1.634	0.109	6.667E-03	1308	592	527	472	526	0.497	1.70	15.46
38	OC	12	3.00	3	230	3.74	21.46	9.8886E-02	0.174	11.2	-0.055	0.606	0.018	6.000E-03	1268	670	537	481	533	0.611	3.04	24.39
39	OC	12	4.00	6	200	3.24	19.3	8.8940E-02	0.168	13.0	-0.11	1.211	0.036	6.000E-03	1169	652	531	476	528	0.63	3.57	26.80
40	OC	12	4.00	9	152	2.46	14.16	5.5253E-02	0.173	9.3	-0.04	1.136	0.006	6.667E-04	831	800	533	475	532	0.481	2.19	27.96
41	OC	13	1.50	15	199	3.17	19.3	8.8940E-02	0.164	5.1	-0.067	1.894	0.011	7.333E-04	1070	839	528	475	525	0.497	1.20	14.31
42	OC	13	1.00	3	183	2.97	17.01	7.8387E-02	0.174	3.0	-0.013	0.379	0.002	6.667E-04	1383	906	535	478	533	0.461	0.79	8.94
43	OC	13	2.00	3	176	2.84	17.01	7.8387E-02	0.167	5.7	-0.013	0.379	0.002	6.667E-04	887	816	529	474	527	0.438	1.24	17.82
44	OC	13	3.00	6	194	2.99	19.3	8.8940E-02	0.164	9.0	-0.027	0.757	0.004	6.667E-04	1027	810	520	470	517	0.477	1.97	26.15
45	OC	13	3.00	6	146	2.35	14.16	5.5253E-02	0.166	7.1	-0.027	0.757	0.004	6.667E-04	898	592	527	472	526	0.391	1.35	22.05
46	OC	13	4.00	3	175	2.82	19.3	8.8940E-02	0.146	11.3	-0.013	0.379	0.002	6.667E-04	1025	816	514	466	511	0.552	2.77	28.27
47	OC	13	4.00	6	153	2.47	17.01	7.8387E-02	0.145	9.9	-0.027	0.757	0.004	6.667E-04	923	891	512	464	510	0.488	2.19	28.30

North Sum: -12.76 99.15 4.82 (Overall core void worth)  
 (in \$) Addp -4.80E-03 Core Top 4.90E+00 (Positive void worth sun)  
 Bddp -3.90E-03 Core Bot



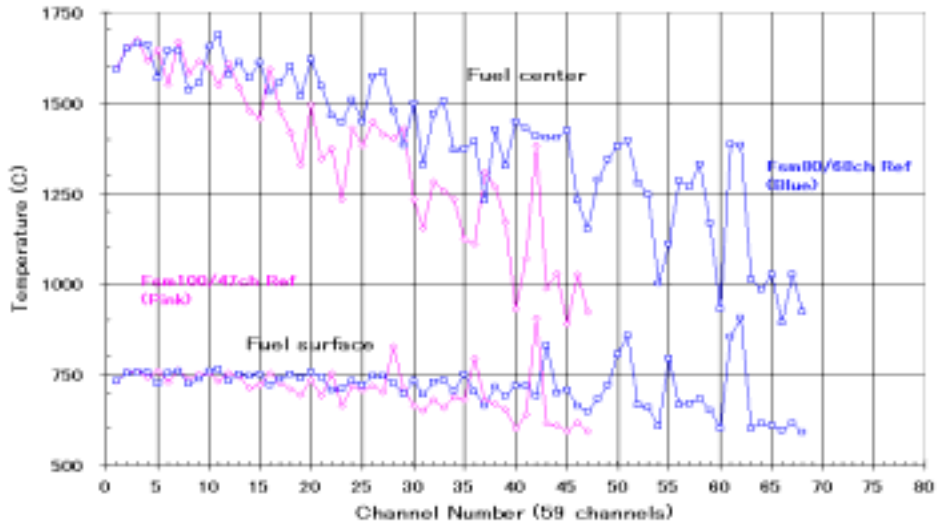


Fig.1 Initial fuel temperature at peak power node: Fsm80/68ch & 47ch models

図 2.5d Fsm80炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 SAS4A Ch.43 vs. Ch.78 of Fsm80

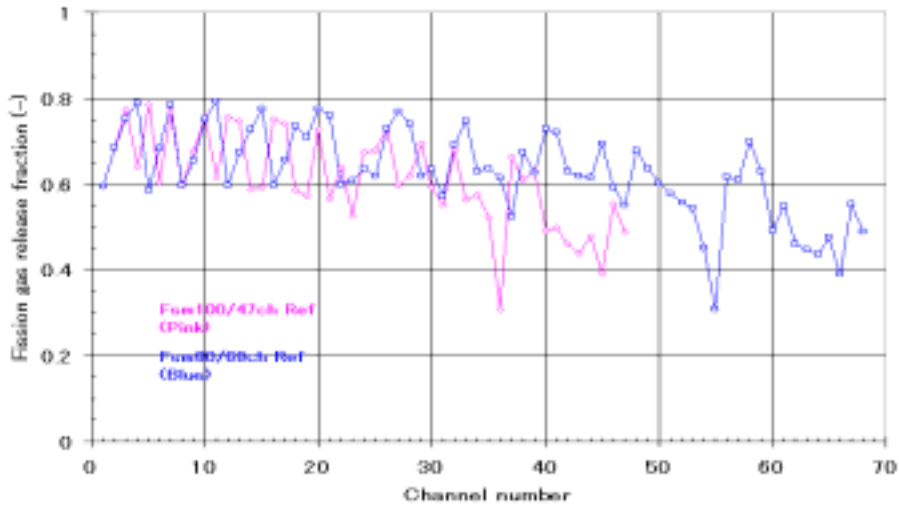


Fig.3 Fission gas release of fuel pins: Fsm80 68ch & 47ch models

図 2.5e Fsm80炉心前照射期間中の燃料ピンFPガス放出率 SAS4A Ch.47 vs. Ch.68 of Fsm80

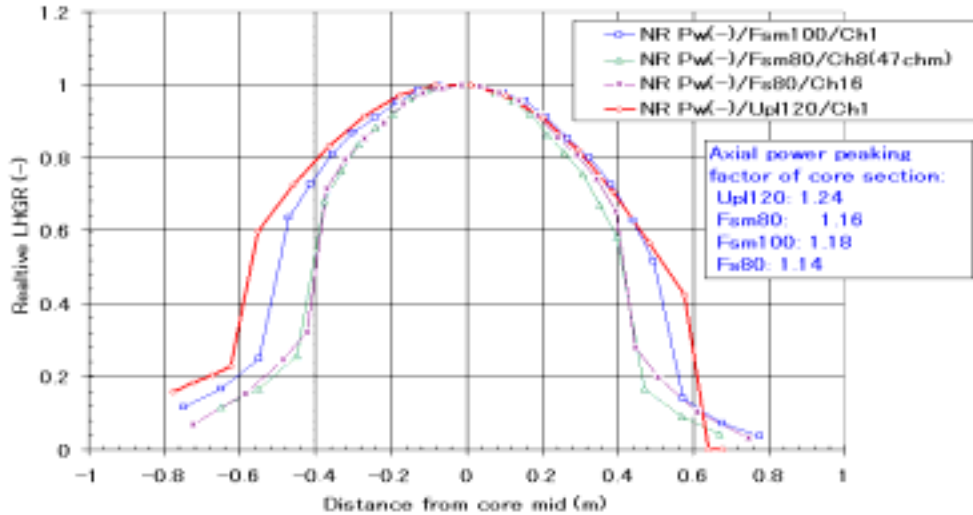


Fig.1a Comparison of relative axial power profiles

図 2.6a 規格化軸方向線出力分布の炉心間比較 (ULOF時最初の破損燃料)  
Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80

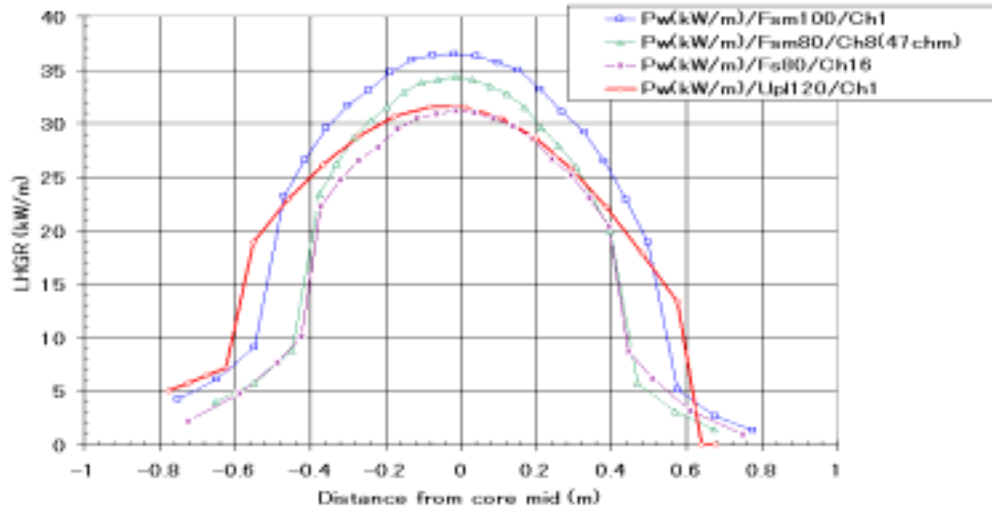


Fig.1b Comparison of axial linear power profiles

図 2.6b 軸方向線出力分布の炉心間比較 (ULOF時最初の破損燃料)  
Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80

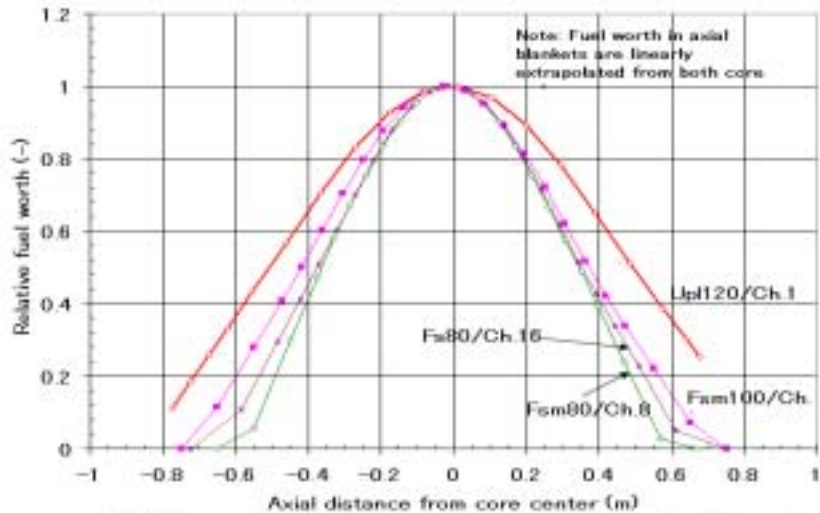


Fig.2. Comparison of axial profile of normalized specific fuel worth

図 2.6c 規格化燃料比ワース軸方向分布の炉心間比較 (ULOF時最初の破損燃料)  
Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80

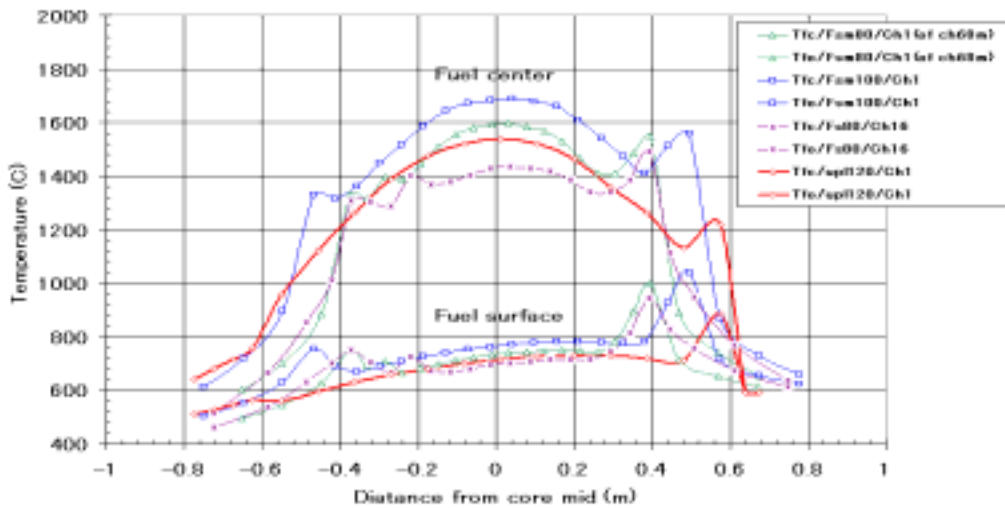


Fig.2 Axial profile of fuel temperature of 1st Lev-channel

図 2.7 軸方向燃料初期温度分布の炉心間比較 (ULOF時最初の破損燃料)  
Fsm100, Fsm80, UPL120, and Fs80

表 2.4 平均線出力、初期炉心平均燃料温度、及び炉心燃料総質量の比較

炉 心	燃料平均線出力 (kW/m)	初期炉心燃料平均温度 少/多チャンネルモデル (K)(注)	炉心燃料総質量 (ton)
UPL120	21.3	1232/1232	37.7
Fsm100	24.7	1302/1312	41.4
Fsm80	25.6	1290/1301	40.7
Fs80	26.9	1313	55.6

(注)二つの平均温度は、それぞれ少数/多数チャンネルモデルに対応。

表 2.5 燃料破損モデル入力定数セット

Table 2.5 Fuel failure condition for MFAL=11 (JNC recommended option)

Input Variables	Block	Location	Used input value	Note (from SAS4A input manual)
IFRREA	1	270	3	In addition to KFALP option, break up propagation if gas release occurs in HT-L nodes, even if melt fraction condition is not fulfilled
TF SOL (K)	13	788-793	3000	Fuel solus temperature
TESOL (K)	13	810-812	1713	Cladding solus temperature
EGFUSO (J/kg)	13	1151	1.0516E+06	Internal energy of fuel at solus point
FNDISR (-)	13	1229	0.5	Min fuel mass melt fraction for Lev-failure 90
DTDISR (K)	13	1230	200	Lev-failure if cladding temp >= TESOL-DTISR
COFFAL	13	1505	1	Coef. for cladding failure stress (only for MFAL=11)
COFFPR	13	1506	1	Coef. for cladding failure stress (for MFAL=11 & KFAL=8)
dn				Coef. for cladding strain rate after failure (for MFAL=7)
ETDISR	13	1516	default=0.0	Min fuel enthalpy condition for failure (only for MFAL=11)
MFAL	51	86	11	Failure model option
JFAL	51	88	default=0	Final model test for failure (only for MFAL=7)
FMELTM (-)	65	2	0.25 (irradiated fuel) / 0.70 (fresh fuel)	Min fuel melt fraction for Ffmo2/Lavrate to be called
TYLD	1	26	0	Cladding flow stress formulation = VEGGEN 4
ULTM	51	508	6	Cladding ultimate tensile stress = VEGGEN 4
ELONG	51	518	6	Cladding uniform elongation = VEGGEN 4
EPSDOT (1/s)	63	255	1.00E-04	Assumed strain rate during steady state gap-irradiation
EPSDOT (1/s)	63	255	1	Also during ULOF transient
TSEPI (K)	63	69	3100	Fuel plastic temperature of DECOGHC model (<=> not used)

Note: (a) SAS4A code calculates a required fuel mass melt fraction based on retained fission gas content in the local fuel node.

MFAIL=11 (破損判定)

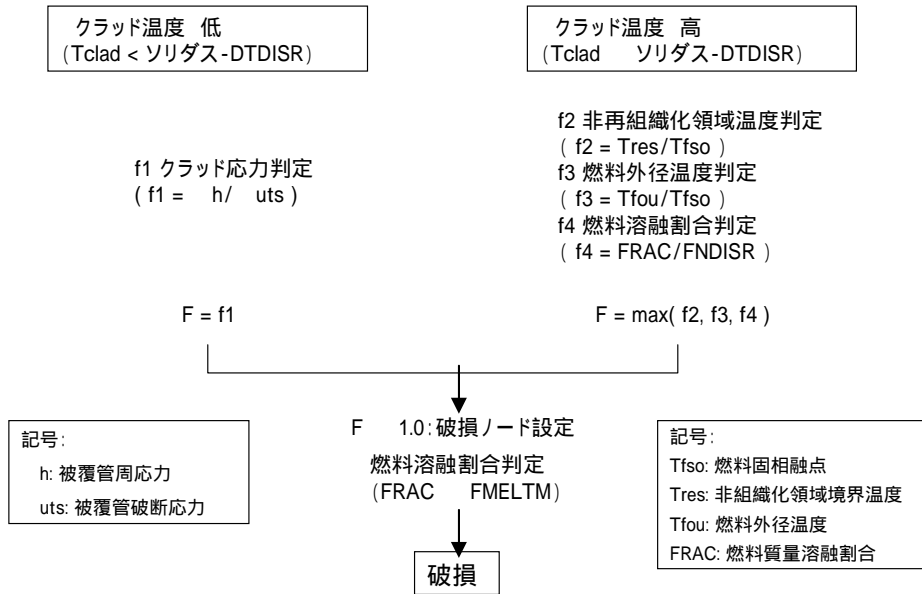


図2.8 過渡時燃料破損判定の流れ (破損モデル: MFAIL=11)

### 3. ULOF 過渡解析結果

基準ケース及びパラメータケースを含むすべての ULOF 計算ケースの結果を表 3.1 及び表 3.2 に示した。表 3.2 は解析を先行した UPL120 炉心ケースの結果を整理したものである。いずれの表も右側から 4 つの列が過渡計算結果から起因過程出力バーストの規模を表す特徴値を示している。これらは以下のものである。

1) 到達最大反応度 – 過渡時の全反応度(Net Reactivity)の最大値。これが 1\$を超えた場合が即発臨界超過ケースとなる。

2) 到達最大炉出力 – 規格化炉出力の最大値。初期出力(通常は定格出力)に対する比で表示した。

3) 過渡時最大炉心燃料平均温度 – 過渡時の炉心燃料温度分布データに基づいて計算された炉心部燃料の平均温度を示す。燃料から構造材及び残留冷却材への熱移行があるため、この値は過渡最大値に達した後、幾分低下する。

4) 等価燃料溶融割合 – 表の脚注に説明したように、3)の炉心平均最大温度に達した時点の炉心燃料の熱エネルギーのもとで燃料を溶融させた場合の溶融質量%を示す。物理的には 0%~100%の範囲内の数値となるが、表にはこの範囲外の数値もそのまま示した。100%を超えた数値は出力バーストの規模が大きいことを示し、平均温度が燃料の液相融点以上に達したケースであることを示している。逆に、負の数値は、平均温度が固相融点以下のケースに対応し、出力バーストの規模が相対的小さい場合に対応する。

以下では、表 3.1 に示した Fsm100/Fsm80 炉心ケースの結果を UPL120 炉心ケース等と比較して記述する。表 3.2 に示した UPL120 炉心のパラメータ解析ケースの結果の説明は省略する。

#### 3.1 基準ケースの結果

Fsm100 及び Fsm80 炉心基準ケースの結果を UPL120 炉心ケースのそれと比較する。図 3.1 に 3 炉心ケースの過渡時炉出力と全反応度を比較した。いずれのケースとも、少数チャンネルモデルの計算結果である。時間軸(Ulof time)は事故発生後の経過時間を示す。冷却材沸騰開始は、どの炉心ケースともに初期の出力/流量比(P/F)が最大のチャンネルが最初となっている。Fsm100 ケースの沸騰開始が約 14s で最も早いのは初期の P/F 値(チャンネル 1 : Ch.1)が 0.246 と、三者の中で最も高いためである(P/F 値は表 2.3a – 2.3c 参照)。いずれの炉心も冷却材の炉心入口温度は 395 である。UPL120 の Ch.1 は P/F 値が 0.245 で Fsm80 の Ch.8(P/F=0.240)よりも高いが、沸騰開始は 3 炉心ケースの中で最も遅くなっている。これは、UPL120 は上部ナトリウムプレナムを有するため、沸騰

開始までの過程で負のナトリウム温度反応度効果があり、正味としては正となる冷却材温度反応度効果を緩和しているため炉出力の上昇が他に比して幾分抑えられているためである。3者の中でUPL120ケースのみが全反応度が1\$超過となっている。その模様を以下に記述する。

### [ Fsm100 炉心ケースの反応度挙動 ]

図 3.2a に Fsm100 炉心ケースの反応度成分の過渡変化を示す。図の冷却材反応度の挙動が出力バーストを駆動した要因である。この出力バーストを停止させているのは燃料破損後の負の燃料分散反応度である。両者の反応度トレースの上に示したマークは、冷却材沸騰発生、部分沸騰チャンネルの燃料破損 (Pluto2 破損) 発生、及びボイド化チャンネルの燃料破損 (Levitare 破損) 発生をチャンネルごとに示している。図 3.2a の時間軸後半を拡大した図を図 3.2b に示す。また、図 3.2c にこれらの反応度の時間微分値 (Ramp rate) と全反応度履歴を示す (時間軸は、最初の燃料破損発生 Ch.1/16.794s (Levitare 破損) 時点からの経過時間で表示)。図 3.2b からこのケースで全反応度を最大値に持ち上げた反応度は、通常の沸騰によるボイド反応度であることがわかる。最初の Pluto2 破損は Ch.11 (t=16.83s) で起きている。冷却材が残っているチャンネルでの燃料破損は熔融燃料から冷却材への熱移行 (FCI) を引き起こすため冷却材の急速なボイド化が起こり、冷却材反応度の挿入率 (\$/s) が通常の沸騰による挿入率に比べて大きくなる。図 3.2c の反応度挿入率から、全反応度が最大となる燃料破損後約 10ms 時点では通常の沸騰によるボイド反応度挿入率は高々 10\$/s である。最初の Pluto2 破損は同図の 35ms で起き、ボイド反応度挿入率は FCI 発生でその後増加し 20\$/s を超えて最大 40\$/s 強に達している。しかし、この時点には Levitare 破損チャンネルの負の燃料分散反応度挿入率が同程度の値となっているために、全反応度の顕著な上昇は起きていない。

出力バーストの規模は、沸騰先行チャンネルの最初の燃料破損発生後の数十 ms の間に、沸騰先行チャンネルで起きる負の燃料分散反応度挿入と、部分または未沸騰チャンネルの燃料破損による FCI 発生に起因するランプレートの高い正のボイド反応度の挿入の競合に支配されている。Fsm100 炉心の基準ケースの反応度挙動は、負の燃料分散反応度挿入が FCI による正のボイド反応度挿入による全反応度の上昇を抑えて、即発臨界超過を回避させるものとなっている。これは一般に、ボイド反応度ワースが 5\$~6\$ を有する炉心の起因過程出力バーストが即発臨界を超えない小規模のものとなるための典型的なパターンとなっている。またこれらの結果は、このケースで何らかの原因により燃料分散反応度挿入が遅れると、即発臨界超過の可能性があることも示唆している。

表 3.1 ULOF 計算ケースと計算結果

Fsm100 & Fsm80炉心/ULOF起因過程計算結果: 出力バースト規模のパラメータ解析

(Run with SAS4A/Ref01R2p)

Case ID	ケース概要	平均比出力密度 (kW/kg-MOX)	初期炉心燃料平均 温度/MOX燃料重量 (K, ton)	到達最大全反応度 (\$)	到達最大炉出力 (P initial)	過渡時最大炉心 燃料平均温度 Tfavmax(K)	等価燃料消費割合 (wt%) (注1)
<b>(a) Fsm100炉心基準ケース及びパラメータケース</b>							
基準ケース(43 channelモデル)	ノミナル条件ケース (ボイドワース: 炉心= 5.7\$)	43	1302K/41.4 ton	0.969	146	2887	-295
Pinit = 0.8*Po (43 chm)	初期炉出力・流量20%減	34	1207K/41.4 ton	1.047	5325	3348	887
Void=1.2*Ref=6.7\$ (43 chm)	炉心ボイドワース= 20%増	43	1302K/41.4 ton	0.976	213	2843	-408
Dop=0.8*Ref	Doppler係数Tdk/dT20%減	43	1302K/41.4 ton	0.977	206	>2630 (rising)	(途中停止)
基準ケース(78 channelモデル)	ノミナル条件ケース (78 channel model)	43	1312K/41.4 ton	0.97	156	2846	-400
Pinit = 0.8*Po (78 chm)	初期炉出力・流量20%減 (78 channel model)	34	1216/41.4 ton	1.016	2465	3040	97
Void=1.2*Ref=6.7\$ (78 chm)	炉心ボイドワース= 20%増 (78 channel model)	43	1312K/41.4 ton	0.979	260	2877	-321
Void=1.5*Ref=8.4\$ (78 chm)	炉心ボイドワース= 50%増 (78 channel model)	43	1312K/41.4 ton	1.04	2835	3023	54
<b>(b) Fsm80炉心基準ケース及びパラメータケース</b>							
基準ケース(47 channelモデル)	ノミナル条件ケース (ボイドワース: 炉心= 4.8\$)	44	1290K/40.7 ton	0.968	163	2921	-208
Pinit = 0.8*Po (47 chm)	初期炉出力・流量20%減	35	1196K/40.7 ton	1.017	1674	3038	92
Void=1.2*Ref=5.9\$ (47 chm)	炉心ボイドワース= 20%増	44	1290K/40.7 ton	0.986	299	2887	-295
Void=1.5*Ref=7.35\$ (47 chm)	炉心ボイドワース= 50%増	44	1290K/40.7 ton	0.987	304	2884	-303
Void=1.75*Ref=8.6\$ (47 chm)	炉心ボイドワース= 75%増	44	1290K/40.7 ton	1.02	1260	3008	15
Dop=0.8*Ref	Doppler係数Tdk/dT20%減	44	1290K/40.7 ton	0.98	238	2930	-185
基準ケース(68 channelモデル)	ノミナル条件ケース (68 channel model)	43	1301K/40.7 ton	0.967	167	2893	-279
Pinit = 0.8*Po (68 chm)	初期炉出力・流量20%減 (68 channel model)	34	1210K/40.7 ton	0.978	346	2958	-113
Void=1.2*Ref=5.9\$ (68 chm)	炉心ボイドワース= 20%増 (68 channel model)	43	1301K/40.7 ton	1.022	861	3003	3
<b>(c) 比較用の他の炉心ケース</b>							
UPL120基準ケース(34 channelモデル)	ノミナル条件ケース (ボイドワース: 炉心= 6\$, 上部Naプレナム= -1\$)	31	1232K / 37.7ton	1.006	937	3016	36
UPL120基準ケース(59 channelモデル)	ノミナル条件ケース (59 channel model)	31	1232K / 37.7ton	1.005	937	3016	36
FS80 (FAIDUS) 基準ケース	ノミナル条件ケース(炉心ボイドワース= 5.2\$)	66	1313K / 55.6ton	0.971	140	2840	-415

(注1) [0, 100] 範囲外の数値は、出力バーストの種類やかさ又は厳しさを示す。  
 等価燃料消費割合 = (Tfavmax - Tfsol)/(Tfliq - Tfsol) \* 100  
 Tfavmax: 過渡時最大炉心燃料平均温度  
 Tfsol: 燃料固相融点 = 3002 K  
 Tfliq: 燃料液相融点 = 3041 K



表 3.2 UPL120 炉心 ULOF 計算ケースと計算結果

UPL120/ULOF起因過程出力バースト規模の炉心出力密度依存性のパラメータ解析

(Run with SAS4A/Ref01R2-Nov ver.)

Case ID	ケース概要	平均比出力密度 (kW/kg-MOX)	初期炉心燃料平均 温度/MOX燃料重量 (K, ton)	到達最大全反応度 (\$)	到達最大炉出力 (P initial)	過渡時最大炉心 燃料平均温度 Tfavmax(K)	等価燃料溶融割合 (wt%) (注1)
<b>(a) UPL120炉心基準ケース及びパラメータケース</b>							
基準ケース(34 channelモデル)	ノミナル条件ケース (ボイドワース: 炉心= 6\$, 上部Naブレナム= -1\$)	31	1232 / 37.7	1.006	937	3016	36
UPL Void=0	上部Naブレナムボイド反応度 = 0	31	1232 / 37.7	1.053	4200	3120	303
Pinit = 1.2*Po	初期炉出力・流量20%増	37	1316 / 37.7	1.008	1122	3029	69
1.3*Doppler	Doppler係数を1.3倍	31	1232 / 37.7	0.939	108	2938	-164
UPL100	炉心長を1mに短尺化	37	1310 / 31.4	0.982	385	3009	18
95%TD Fuel	燃料ペレット密度を95%TD	31	1213 / 37.7	1.009	876	3011	23
基準ケース(59 channelモデル)	ノミナル条件ケース (59 channel model)	31	1232/37.7	1.005	937	3016	36
<b>(b) 比較用の他の炉心ケース</b>							
FS80 (FAIDUS) 炉心基準ケース	ノミナル条件ケース(炉心ボイド ワース= 5.2\$)	66	1313 / 55.6	0.971	140	2840	-415
FS120 (FAIDUS) 炉心基準ケース	ノミナル条件ケース(炉心ボイド ワース= 7.4\$)	53	1334 / 71.4	1.073	6358	3551	1408

(注1) [0, 100] 範囲外の数値は、出力バーストの種やかさ又は厳しさを示す。  
 等価燃料溶融割合 = (Tfavmax - Tfsol)/(Tfliq - Tfsol) \* 100  
 Tfavmax: 過渡時最大炉心燃料平均温度  
 Tfsol: 燃料固相融点 = 3002 K  
 Tfliq: 燃料液相融点 = 3041 K

### [ Fsm100/UPL120 炉心ケース間の比較 ]

図 3.3a-3.3d に UPL120 炉心ケースの反応度成分及び反応度挿入率の過渡変化を示す。図 3.3c から、UPL120 ケースでは Pluto2 破損発生後の FCI による 20\$/s を超えるボイド反応度挿入率(図 3.3d 参照)が全反応度を 1\$以上に持ち上げていることが分かる。即発臨界超過時点は最初の Levitate 破損発生後すでに 60ms 経過しているが、負の燃料分散反応度挿入率は-10\$/s にしか達しておらず、これに即応的な負の Doppler 反応度及び軸方向燃料分散反応度挿入率(-15\$/s)を加えても、25\$/s を超える正のボイド反応度挿入を相殺できず、1\$超過となっている。Fsm100 ケースの記述の後半で、もし燃料分散反応度挿入が遅れた場合はというシナリオにふれたが、UPL120 ケースはまさにそれが起きているケースに相当する。

図 3.3e に両炉心ケースの燃料移動反応度及び全反応度の変化を比較した。時間軸は各ケースの最初の Levitate 破損発生時点からの経過時間で表示した。図から UPL120 ケースの燃料分散反応度挿入が Fsm100 ケースと比較して遅れている様子が分かり、この遅れが原因で全反応度は 1\$を超過している。分析の結果、UPL120 炉心ケースの燃料分散反応度挿入遅れの原因は、炉心長が長尺(1.2m)であること、及び、炉心の比出力密度が既往の大型炉の約 1/2 と顕著に低いこと、であると結論できた。Fsm100 炉心の設計仕様の検討ではこの結論を踏まえて、UPL120 炉心に比べて、炉心長の短尺化及び比出力密度の増加が考慮された。従って、Fsm100 炉心ケースの結果がマイルドな出力バーストシナリオとなったのは、先の結論が正しかったことを示している。

### [ Fsm80 炉心ケースの結果と 4 炉心の比較 ]

Fsm80 炉心の設計では、Fsm100 炉心のボイド反応度が 5.7\$となったため、ボイド反応度を 5\$程度まで低減すべく検討された。炉心長を 80cm まで短尺化したのはそのためである。

Fsm80 炉心の ULOF 解析結果を UPL120 炉心ケースと比較すると、上述した Fsm100 の場合とほぼ同様の結果となっている。従って、比較の説明を省力して、以下の図に Fsm80 ケースの結果を示す。

図 3.4a: 反応度変化

図 3.4b: 反応度変化 (後半部)

図 3.4c: 反応度挿入率と全反応度履歴

図 3.5a: 燃料・全反応度の UPL120 ケースとの比較

図 3.5b: 燃料・全反応度の Fsm100 ケースとの比較

図 3.5b に示した Fsm80 と Fsm100 ケースの燃料移動反応度挿入挙動を比較すると、20cm 短尺の Fsm80 ケースでは燃料分散反応度挿入が幾分早くなることを

予想したが、顕著な違いはみられない。前述の表 1.1 に示した燃料集合体ラッパー管内に占める燃料とスチールの体積割合を両炉心で比較すると、Fsm80 の方が僅かながら大きい。一般にこの体積割合が大きいほど、ラッパー管内での燃料の軸方向分散挙動は抑えられる(実効流動抵抗が大きくなる)ため、この因子が Fsm80 炉心ケースの燃料移動反応度挿入遅れをもたらしている可能性がある。

図 3.6a に、4 つの炉心の ULOF 計算結果から、燃料温度反応度(Doppler+軸方向膨張反応度)挿入率と規格化炉出力の関係を示した。2.1 節に記したように、この反応度挿入率は炉心の比出力密度に依存する。これら 4 者の中で UPL120 炉心は比出力密度が最も低いために、Doppler 係数が最も大きいにもかかわらず、出力上昇時の燃料温度反応度フィードバックによるブレーキが最も緩いことが分かる。比出力密度がほぼ同じ Fsm100 と Fsm80 炉心では、Doppler 係数が約 10% 小さい Fsm80 ケースの方が、炉出力上昇に対するブレーキが Fsm100 炉心よりも緩い模様が分かる。図で比出力密度が最も高い大型炉 Fs80 炉心は、UPL120 に比べて出力上昇に対するブレーキがかかりやすい特性のあることを示している。ブレーキの緩い炉心ほど、LOF-driven-TOP 時に余分な出力上昇を引き起こすことになり、即発臨界超過につながりやすくなる。

表 3.3 に、4 つの炉心ケースの ULOF 時の主要な現象発生時点までの炉心の過渡エネルギー放出量を比較した。エネルギー放出量は規格化炉出力の時間積分値(fps: full-power-second)で示した。最初の冷却材沸騰開始までのエネルギー放出量は、比出力密度が顕著に異なる Fs80 と他炉心で同程度の値となっている。これは冷却材沸騰挙動が燃料の線出力と出力/流量比の特性(4 炉心で大差はない)で決まり、比出力密度には依存しないことに対応している。燃料溶融が発生してから起きる燃料破損のタイミングは比出力密度に依存する。特に、最初の燃料破損発生から負の燃料分散反応度が挿入されるまでの fps 値は、比出力密度が最大の Fs80 炉心で最も小さく、最小の UPL120 炉心で最も大きい結果となっている。これは上述した UPL120 炉心ケースの燃料分散開始タイミングが他の炉心ケースに比べて遅れていたことに対応している。

図 3.6b に 4 炉心の燃料移動反応度挿入挙動を、過渡炉出力を併記して比較した。横軸の時間は、それぞれのケースで最初の燃料破損(ボイド化チャンネルの Levitate 破損)発生時点からの経過時間である。図 3.6c に 4 炉心ケースの冷却材反応度及び燃料移動反応度の挿入率を示した。燃料移動反応度挿入の速さは燃料の加熱速度に依存するが、断熱条件下では加熱速度は規格化炉出力と比出力密度の積に比例する。大型炉 Fs80 と 3 つの中型炉を比較すると、比出力密度が最も高い Fs80 炉心ケースでは速やかに負の燃料分散反応度が挿入されているのに対して、比出力密度が低い中型炉ケースでは燃料分散反応度の挿入が遅れている。その遅れが最も顕著となった UPL120 炉心は 4 者の中で比出力密度が最

も低い。負の燃料分散反応度挿入が遅れている間に、未・部分沸騰チャンネルの燃料破損(Pluto2 破損)にともなう FCI による急速なボイド反応度挿入が即発臨界超過の出力バーストをもたらした原因となっている。

Fsm100 及び Fsm80 炉心基準ケースの ULOF 起因過程は、この後、遷移過程シナリオへ移行する。遷移過程の初期の炉心状態(過渡時間  $t=18.12$  秒)を、Fsm100 のケースについて、表 3.4 及び図 3.6d (1/3)-(3/3)に示す。この時点で炉心は約-0.7\$の未臨界状態にあるが、炉出力は定格値の 2.7 倍の状態にある。炉心燃料質量の 7%が溶融状態にある。炉心平均の冷却材ボイド率は 95%である。図 3.6d がこの時点の各 SAS4A チャンネルの燃料、被覆材、冷却材の分布状態を示している。これが Fsm100 基準ケースの遷移過程解析の初期条件となる。

### 3.2 パラメータ解析ケースの結果

Fsm100 及び Fsm80 炉心の ULOF ノミナル条件ケースは、いずれも即発臨界以下のマイルドな出力バーストとなることが確認できた。炉心設計計算の炉心ボイド反応度及び Doppler 係数評価の不確かさは、2<sup>次</sup> でそれぞれ  $\pm 20\%$ 及び  $\pm 15\%$ となる。この不確かさ内で ULOF 起因過程が即発臨界超過とまらないことを確認するために、これらの反応度係数の不確かさを独立に保守側(出力バーストが厳しくなる側)に想定したケースを解析した。また、これらの炉心は UPL120 に比して比出力密度が 1.38~1.4 倍に上げられている。比出力密度を下げた場合の裕度を把握するためのパラメータケースを設定した。

#### (a) ボイド反応度ワース増大ケース

Fsm100 及び Fsm80 炉心ケースでボイド反応度比ワース( $dk/kk'/\text{kg-sodium}$ 、全チャンネルの軸方向分布)に一定値を乗じたケースを設定する(ワースの  $\pm$  符号に依存せず一定倍する)。計算結果を表 3.1 に示した。ここでは、Fsm100 炉心ケースについて結果を記述する。

図 3.7 に、Fsm100 炉心基準ケース(ボイドワース=5.7\$)及びボイドワースに定数 1.2、及び 1.5 を乗じたケースの炉出力と全反応度の過渡変化を比較した(78 チャンネルモデルのケースで比較)。ボイドワースを増大したケースはいずれも基準ケースよりも厳しくなるが 1.2 倍ケース(ボイドワース 6.7\$相当)は即発臨界以下に収まっている。1.5 倍ケース(ボイドワース 8.4\$相当)は即発臨界を超過している。1.5 倍ケースの反応度成分とそれらの時間変化率(Ramp rate)を図 3.8a、3.8b に示す。即発臨界超過は、未・部分沸騰チャンネルの燃料破損による急速なボイド反応度挿入に起因している。全反応度が 1\$を超過する時点はボイド化チャンネルの最初の燃料崩壊発生後 17ms(0.017s)だが、負の燃料分散反応度挿入は未だ起きていない。この時点の FCI 発生に起因するボイド反応度挿入率は 20\$/s を少し超えている。図 3.9 に 3 つのケースのボイド反応度、燃料

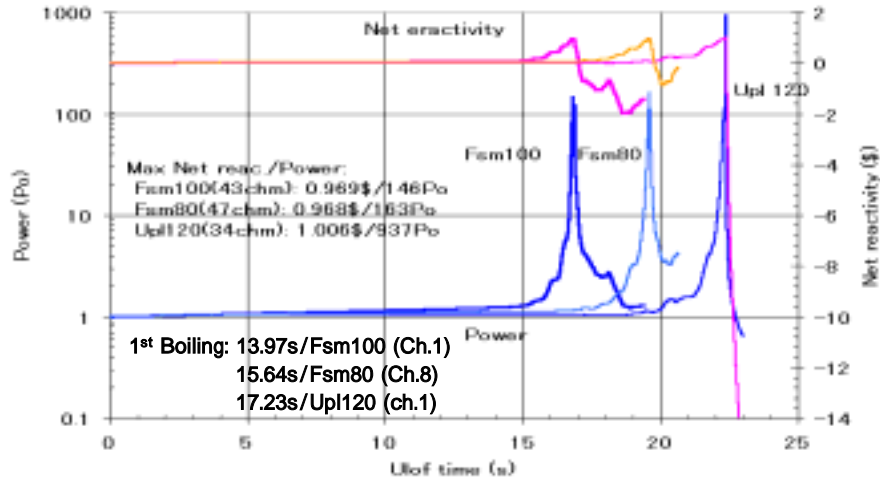


Fig.1 Power and net reactivity/Fsm80, Fsm100 vs. Upl120

図3.1 Fsm80, Fsm100とUPL120炉心のULOF比較  
 炉出力と全反応度 (基準ケース)

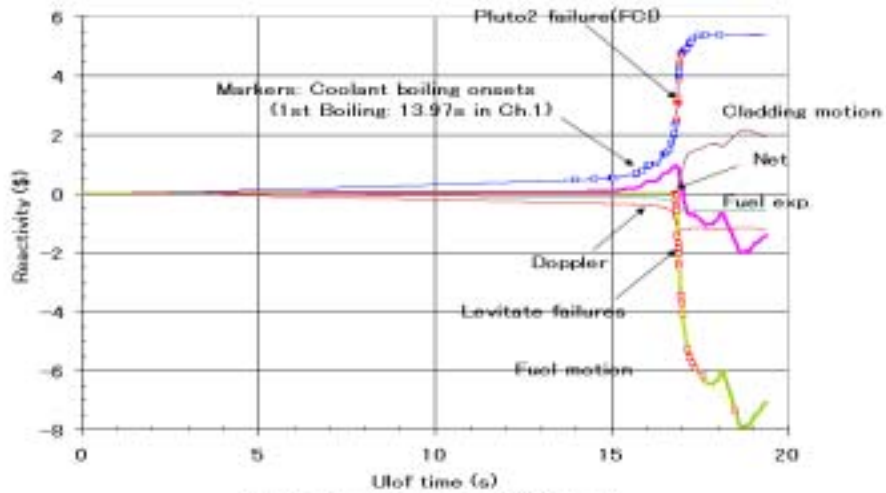


Fig.2a Reactivity/ Fsm100(43chm)

図3.2a Fsm100炉心ULOF結果 - 反応度

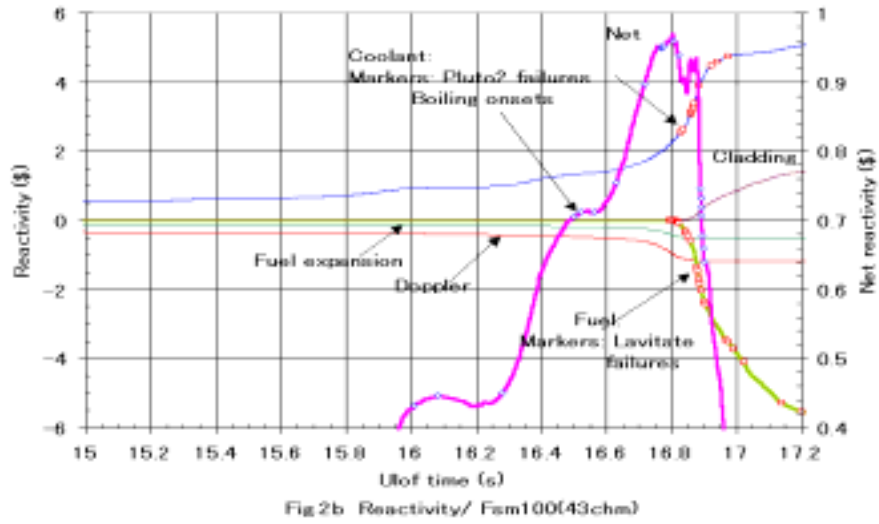


図3.2b Fsm100炉心ULOF結果 - 過渡後半の反応度

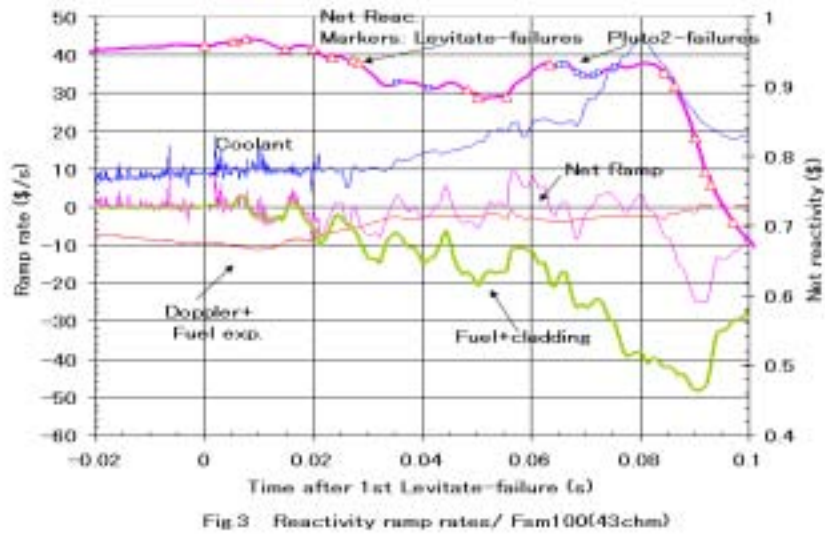


図3.2c Fsm100炉心ULOF結果 - 反応度の時間微分(Ramp rate)

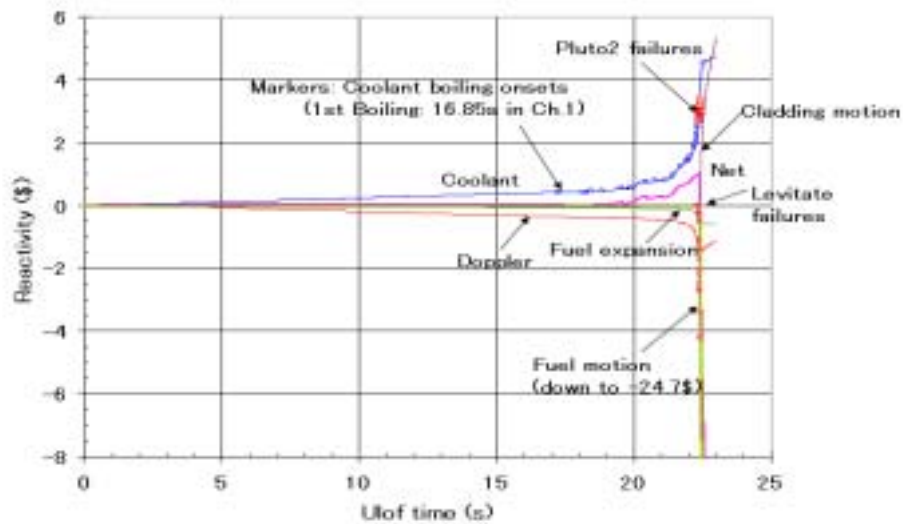


Fig.2a Reactivity/UPL120/Ref

図3.3a UPL120炉心ULOF結果 - 全反応度と反応度成分

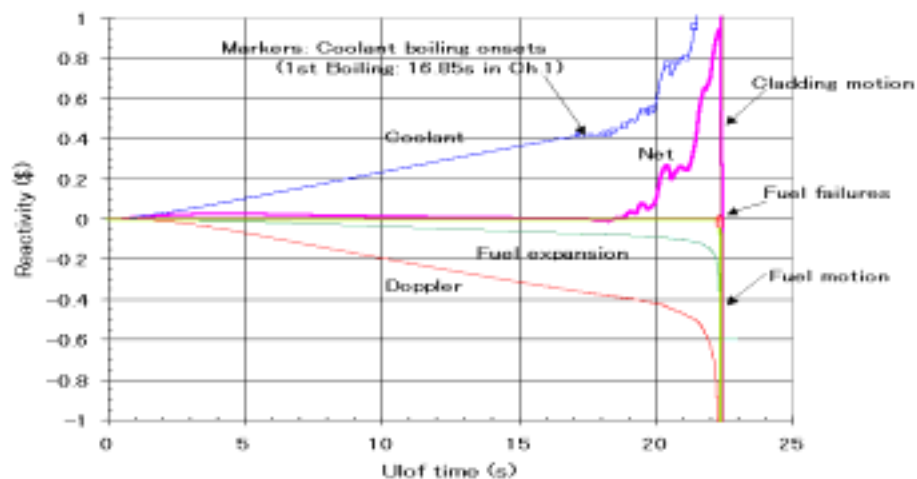


Fig.2a Reactivity/UPL120/Ref (Early stage)

図3.3b UPL120炉心ULOF結果 - 過渡前半の主要反応度

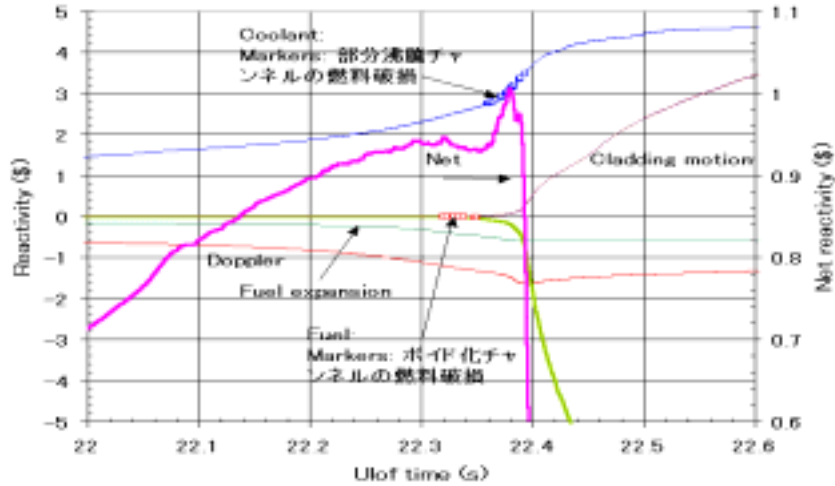


Fig.2b Reactivity/UPL120/Ref (Final stage)

図3.3c UPL120炉心ULOF結果 - 過渡後半の反応度

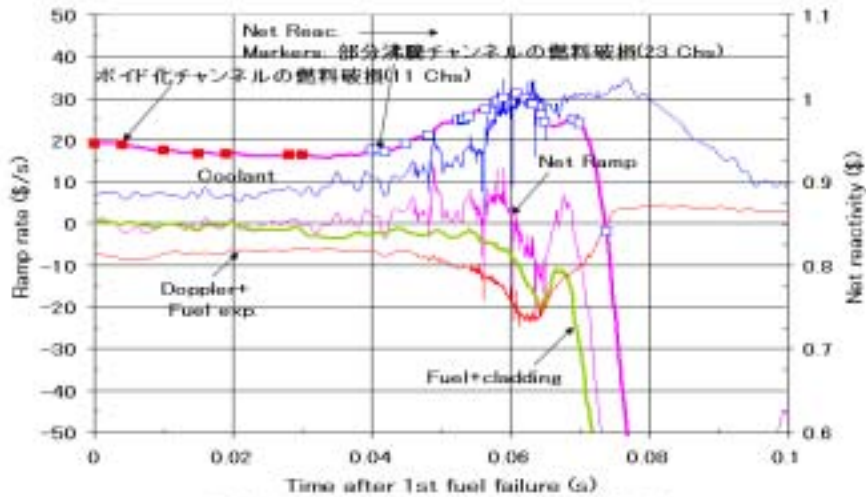


Fig.3.3b Reactivity ramp rate/UPL120/Ref

図3.3d UPL120炉心ULOF結果 - 全反応度と反応度挿入率



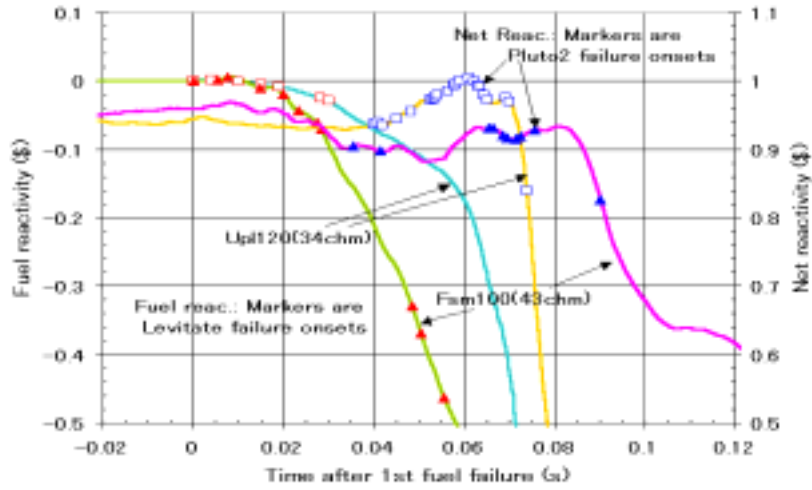


Fig.4 Fuel and net reactivity/Fsm100 vs. UPL120

図3.3e Fsm100とUPL120炉心のULOF比較 - 燃料及び全反応度 (基準ケース)

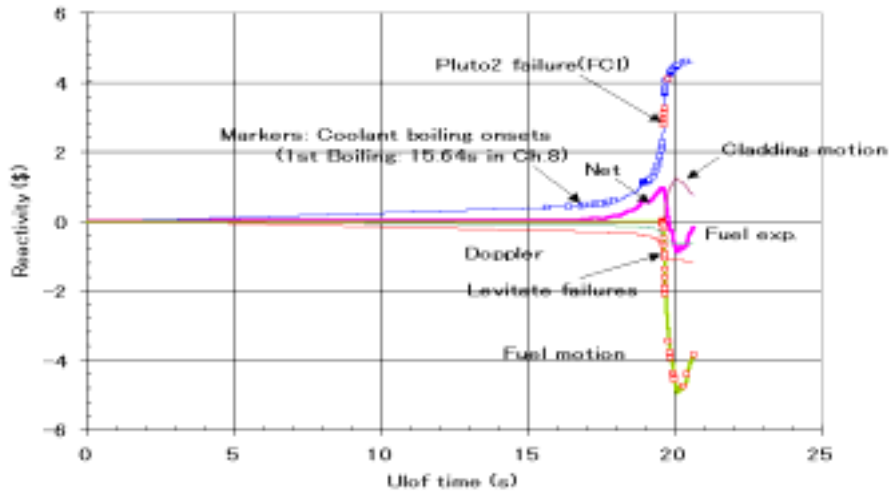


Fig.2 Reactivity/ Fsm80 (47chm)

図3.4a Fsm80炉心ULOF結果 - 反応度

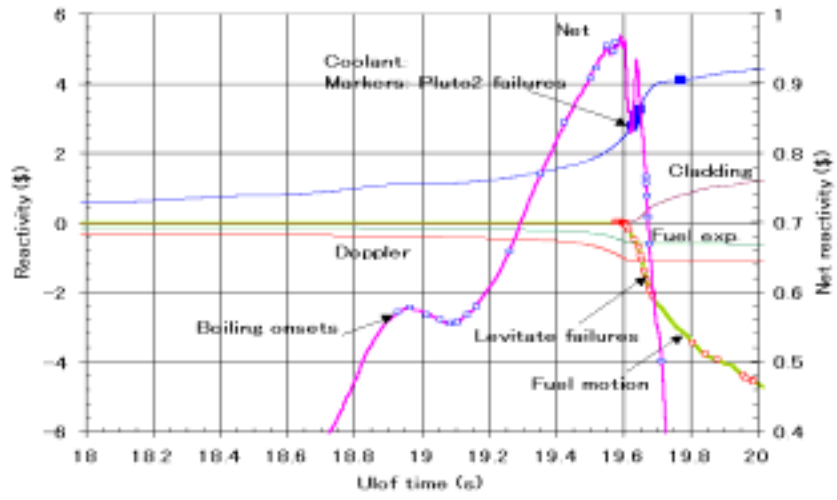


Fig.2 Reactivity/ Fsm80 (47chm)

図3.4b Fsm80炉心ULOF結果 - 過渡後半の反応度

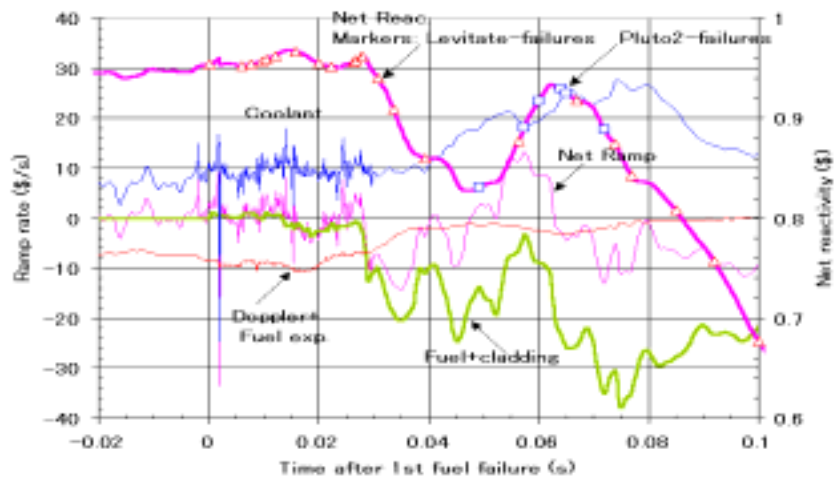


Fig.4 Reactivity ramp rate/ Fsm80 (47chm)

図3.4c Fsm80炉心ULOF結果 - 反応度の時間微分(Ramp rate)

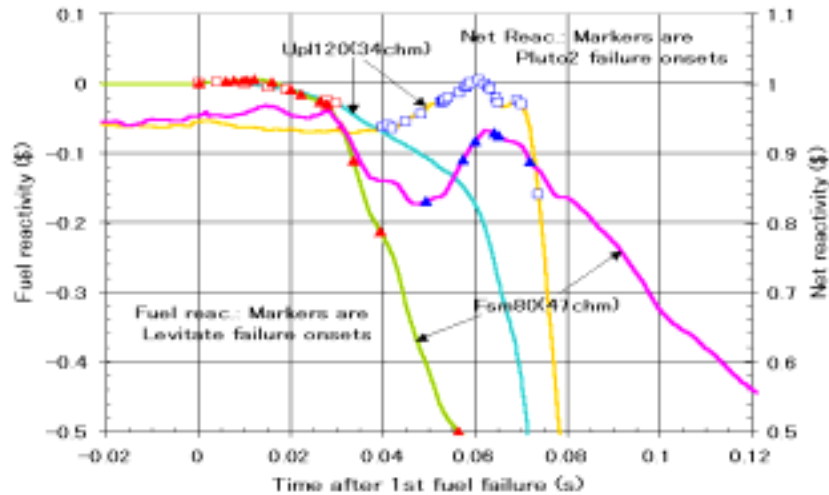


Fig 4a Fuel and net reactivity/Fsm80 vs. UPL120

図3.5a Fsm80とUPL120炉心のULOF比較 - 燃料及び全反応度 (基準ケース)

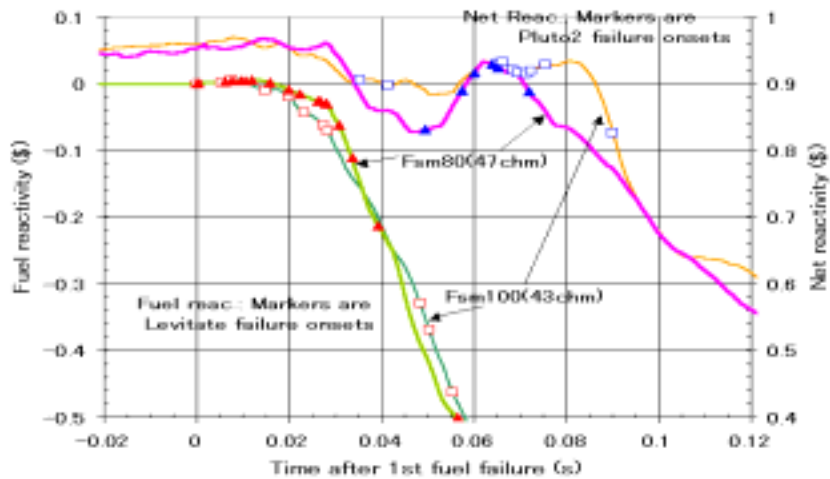


Fig 4b Fuel and net reactivity/Fsm80 vs. Fsm100

図3.5b Fsm80とFsm100炉心のULOF比較 - 燃料及び全反応度 (基準ケース)

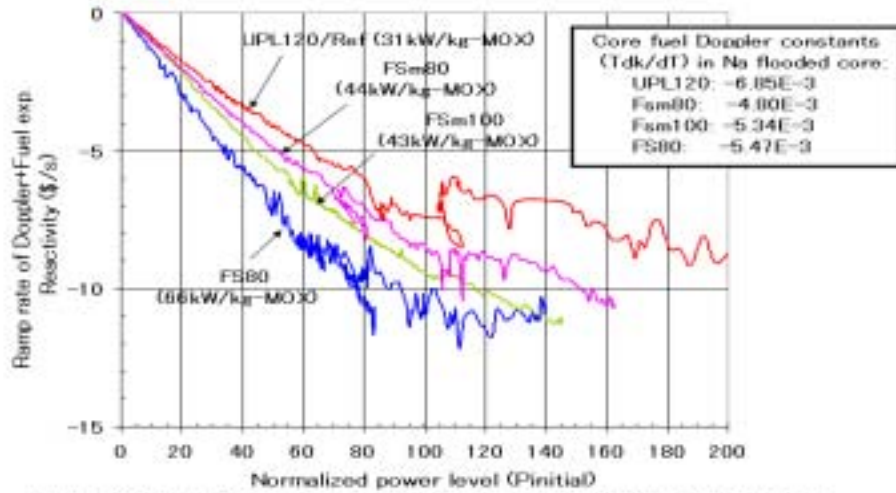


Fig.3.6a Comparison of ramp rates of (Doppler+Fuel exp.) reactivity vs. Power

図3.6a 炉出力上昇に対する燃料温度反応度挿入率の比較  
(燃料温度反応度 = Doppler+Fuel expansion)

表 3.3 冷却材沸騰開始後の過渡エネルギー放出量の炉心ケース間比較  
(基準ケース間の比較)

Table 3.3 Comparison of relative energy release during ULOF transient of Ref. case				
Core Design	UPL120	Fsm100	Fsm80	Fa80
Reactor rated thermal power (MW)	1190	1785	1785	3800
Average fuel specific power density P <sub>do</sub> (kW/kg-MOX)	31.3	43.1	43.8	65.5
Relative P <sub>do</sub> (-)	1	1.4	1.4	2.1
Energy release during transient (in fps: full-power-second):				
Up to 1st boiling onset (fps)	17.97	15.48	16.7	16.18
from 1st boiling to 1st fuel disruption (Levitate type failure) (fps)	16.26	10.38	12.63	10.3
from 1st Levitate failure to 1st burst fuel failure (Pluto2 type failure) (fps)	4.55	4.06	5.27	1.96
from 1st fuel disruption to insertion of -0.1\$ negative fuel dispersion reactivity (fps)	5.66	3.68	4.4	1.48

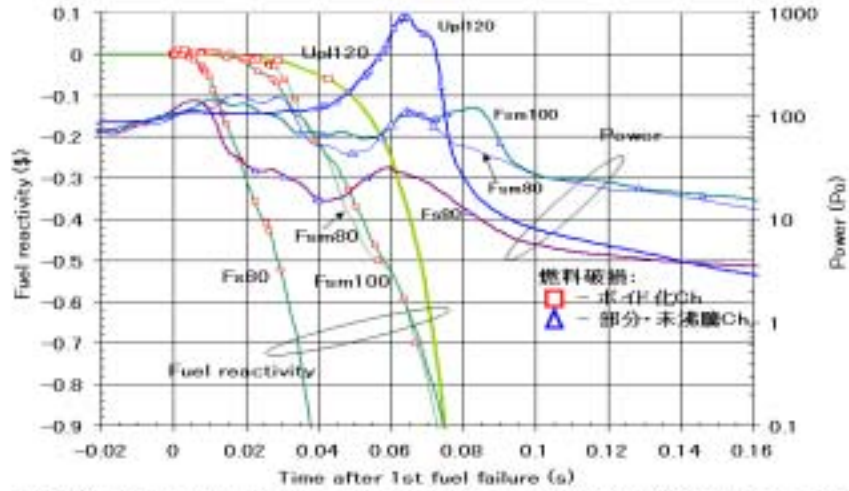


Fig 3.6b Power level and fuel reactivity insertion: Fm100/Fm80/Up102 vs. Fx80

図3.6b 過渡末期の炉出力と燃料移動反応度挿入挙動の比較  
燃料分散反応度挿入挙動の比出力密度依存性の比較

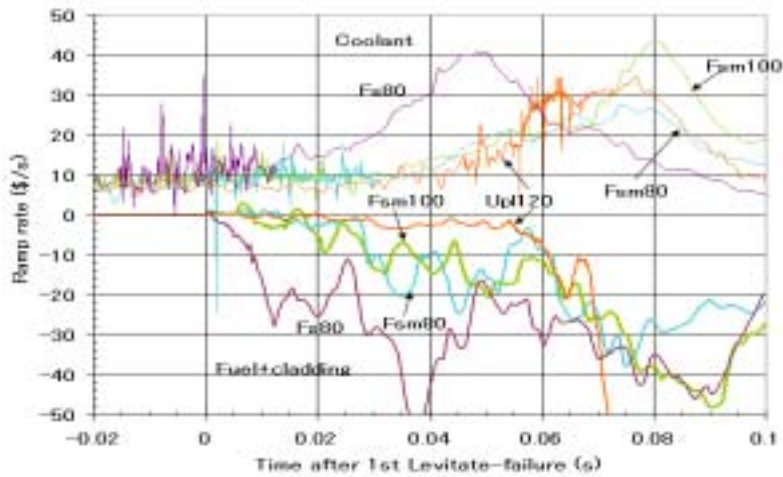


Fig 3 Comparison of reactivity ramp rates of coolant and fuel

図3.6c 過渡末期の燃料及びボイド反応度挿入率の比較  
燃料及びボイド反応度挿入率の比較

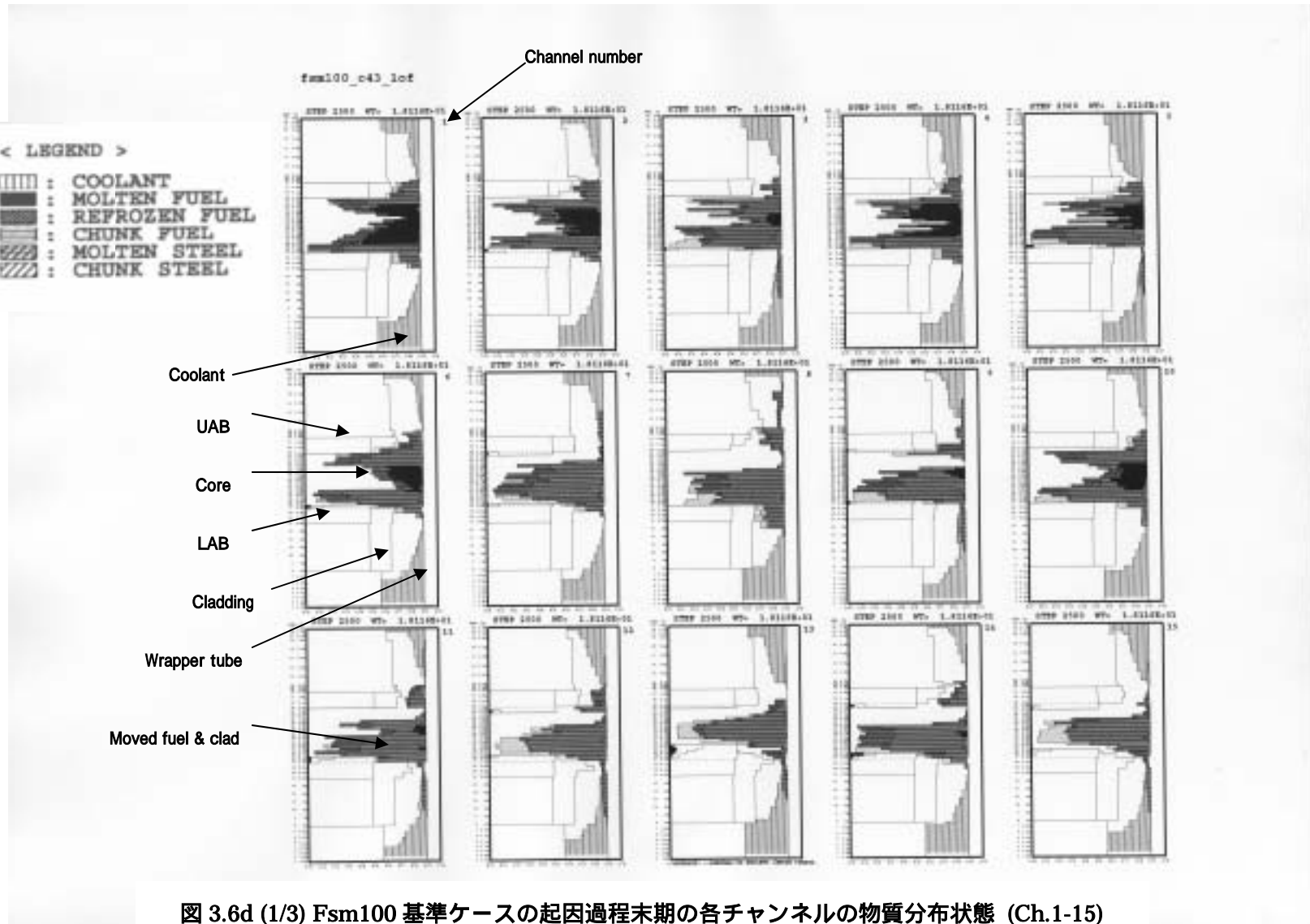
表3.4 Fsm100炉心基準ケースのULOF起因過程出力バースト終了時の炉心状態 (18.12秒時点)

Table 3.4 Core state at the end of primary power burst (at 18.12s) in Case Fsm100/43chm\_Ref (New edit)

Core Zone	Ch. No.	No. of Fas	Initial average power/FA (MW)	Ch. State (#1)	Solid fuel mass (kg)	Molten fuel mass (kg)	Average fuel melt fraction (-)	Solid fuel temperature (K)	Molten fuel temperature (K)	Average temperature (K)	Max fuel temperature (K)	Core Na void fraction (-)
IC	1	3	7.44	2	2.06E+02	1.67E+02	4.48E-01	2886	3324	3082	3477	1.00
IC	2	9	6.79	2	8.08E+02	3.11E+02	2.78E-01	2914	3161	2982	3218	1.00
IC	3	6	6.54	2	7.10E+02	3.56E+01	4.78E-02	2887	3044	2895	3062	1.00
IC	4	12	6.99	2	9.09E+02	5.83E+02	3.91E-01	2923	3239	3046	3340	1.00
IC	5	6	6.38	2	6.03E+02	1.42E+02	1.91E-01	2905	3092	2941	3141	1.00
IC	6	24	6.50	2	2.38E+03	6.00E+02	2.01E-01	2920	3143	2965	3208	1.00
IC	7	15	6.02	2	1.86E+03	9.24E+00	4.95E-03	2914	3005	2915	3041	1.00
IC	8	9	6.26	2	1.12E+03	1.40E+00	1.25E-03	2822	3012	2823	3028	1.00
IC	9	12	6.08	2	1.42E+03	7.13E+01	4.78E-02	2870	3033	2878	3037	1.00
IC	10	6	6.82	2	5.91E+02	1.55E+02	2.07E-01	2957	3115	2990	3196	1.00
IC	11	9	6.16	2	1.08E+03	4.10E+01	3.66E-02	2845	3028	2852	3036	1.00
IC	12	6	5.38	2	7.43E+02	3.31E+00	4.44E-03	2798	3006	2799	3020	1.00
IC	13	6	5.20	2	7.33E+02	1.30E+01	1.74E-02	2791	3007	2795	3023	1.00
IC	14	12	6.10	2	1.43E+03	5.74E+01	3.85E-02	2899	3017	2904	3041	1.00
IC	15	6	5.35	2	7.42E+02	3.46E+00	4.63E-03	2773	3008	2774	3019	1.00
IC	16	9	5.68	2	1.10E+03	1.66E+01	1.48E-02	2905	3015	2906	3027	1.00
IC	17	3	4.61	2	3.73E+02	2.28E-15	6.13E-18	2627	2675	2627	3017	1.00
IC	18	3	4.63	2	3.67E+02	6.39E+00	1.71E-02	2791	3014	2795	3043	0.71
IC	19	9	5.39	2	1.09E+03	2.38E+01	2.12E-02	2844	3009	2847	3019	1.00
IC	20	3	4.87	2	3.34E+02	1.86E+01	5.00E-02	2654	3010	2672	3024	1.00
OC	21	3	4.43	2	3.62E+02	1.12E+01	3.02E-02	2643	3011	2654	3023	0.71
OC	22	3	5.80	2	3.72E+02	4.74E-01	1.27E-03	2853	3006	2853	3025	1.00
IC	23	3	4.36	2	3.56E+02	1.65E+01	4.43E-02	2522	3009	2544	3020	0.71
IC	24	9	5.04	2	1.12E+03	2.25E+00	2.01E-03	2822	3005	2822	3019	1.00
IC	25	3	4.56	2	3.65E+02	8.39E+00	2.25E-02	2596	3009	2606	3019	1.00
OC	26	6	5.56	2	7.39E+02	6.84E+00	9.16E-03	2810	3010	2811	3024	1.00
OC	27	3	3.55	1	3.10E+02	6.32E+01	1.69E-01	2541	3015	2621	3026	1.00
OC	28	6	5.22	2	7.46E+02	6.57E-15	8.81E-18	2853	2102	2853	3086	1.00
OC	29	15	5.39	2	1.84E+03	2.24E+01	1.20E-02	2830	3007	2832	3024	1.00
OC	30	6	3.53	1	6.90E+02	5.59E+01	7.50E-02	2389	3007	2435	3014	1.00
OC	31	15	4.87	2	1.86E+03	7.26E+00	3.89E-03	2772	3006	2773	3020	1.00
OC	32	12	4.05	2	1.46E+03	3.11E+01	2.09E-02	2540	3012	2550	3020	0.71
OC	33	12	3.62	1	1.37E+03	1.20E+02	8.06E-02	2440	3010	2486	3016	1.00
OC	34	9	4.24	2	1.10E+03	2.23E+01	2.00E-02	2684	3010	2690	3025	0.71
OC	35	6	5.15	2	7.41E+02	4.86E+00	6.52E-03	2848	3009	2849	3126	1.00
OC	36	9	2.76	1	1.12E+03	0.00E+00	0.00E+00	2308	0	2308	2840	0.00
OC	37	6	4.56	2	7.22E+02	2.39E+01	3.21E-02	2637	3008	2649	3024	1.00
OC	38	6	3.21	1	7.46E+02	0.00E+00	0.00E+00	2360	0	2360	2943	1.00
OC	39	3	2.64	1	3.73E+02	0.00E+00	0.00E+00	2105	0	2105	2645	1.00
OC	40	9	3.75	1	1.00E+03	1.18E+02	1.06E-01	2511	3011	2564	3018	1.00
OC	41	9	3.38	1	1.10E+03	2.18E+01	1.94E-02	2363	3004	2375	3006	1.00
OC	42	9	3.10	1	1.12E+03	0.00E+00	0.00E+00	2309	0	2309	2881	1.00
OC	43	3	3.04	1	3.73E+02	0.00E+00	0.00E+00	2216	0	2216	2849	1.00

Note #1: 0: No boiling, 1: Boiling & fuel melting (plus clad melting & motion), 2: Levitate-failure, 3: Pluto-failure

Active Core Information at the specified time of Initiating Phase	
Power level at the specified time (Po)	2.69E+00
Net reactivity at the specified time (β)	-6.68E-01
Total mass of solid fuel (kg)	3.86E+04
Total mass of molten fuel (kg)	2.80E+03
Core fuel melt fraction (wt %)	7
Mass average temperature of solid fuel (K)	2723
Mass average temperature of molten fuel (K)	3133
Max fuel temperature in the core (K) in Channel-1	3477
Average core fuel temperature (K)	2898
Core coolant void fraction (%)	95



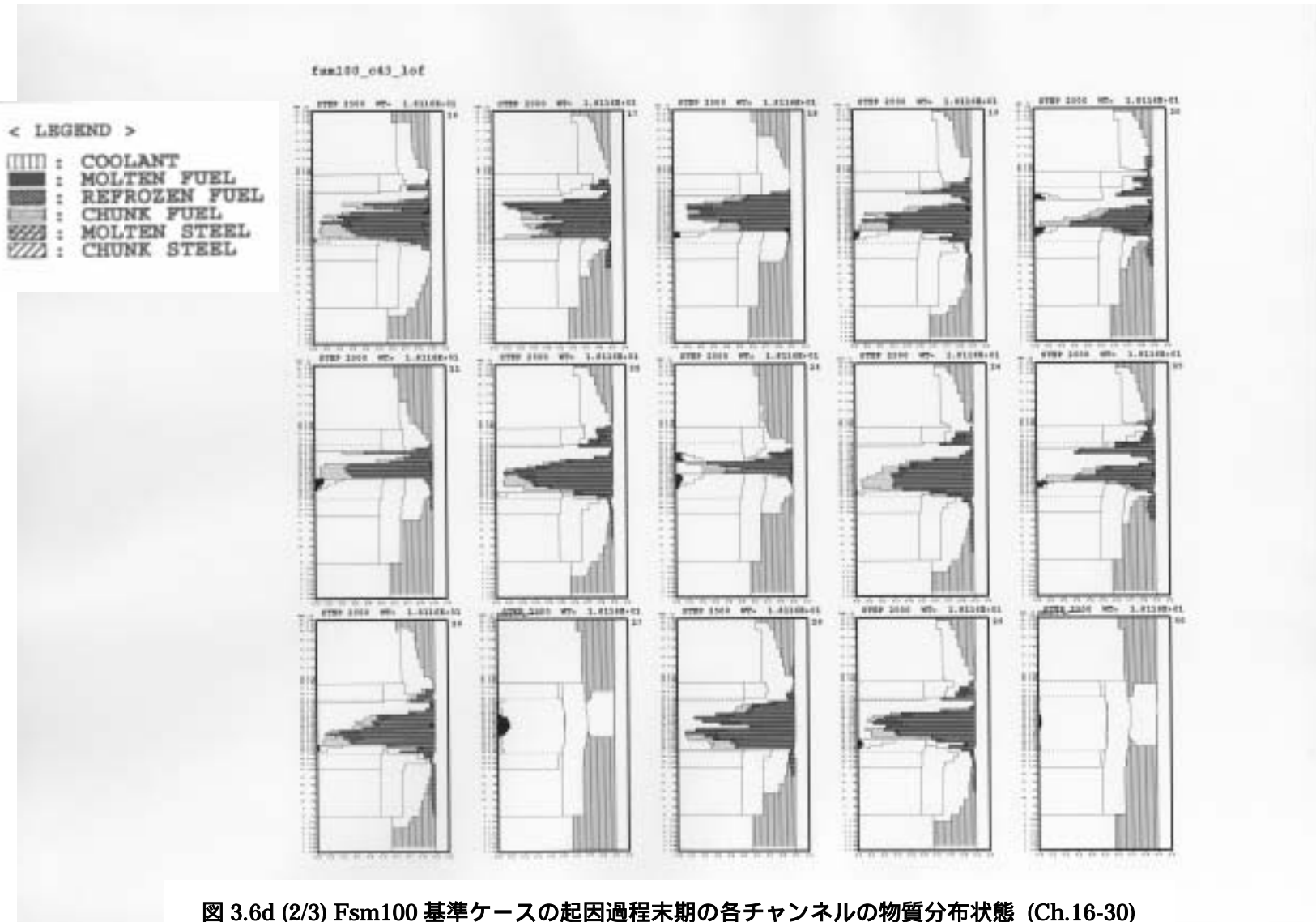


図 3.6d (2/3) Fsm100 基準ケースの起因過程末期の各チャンネルの物質分布状態 (Ch.16-30)



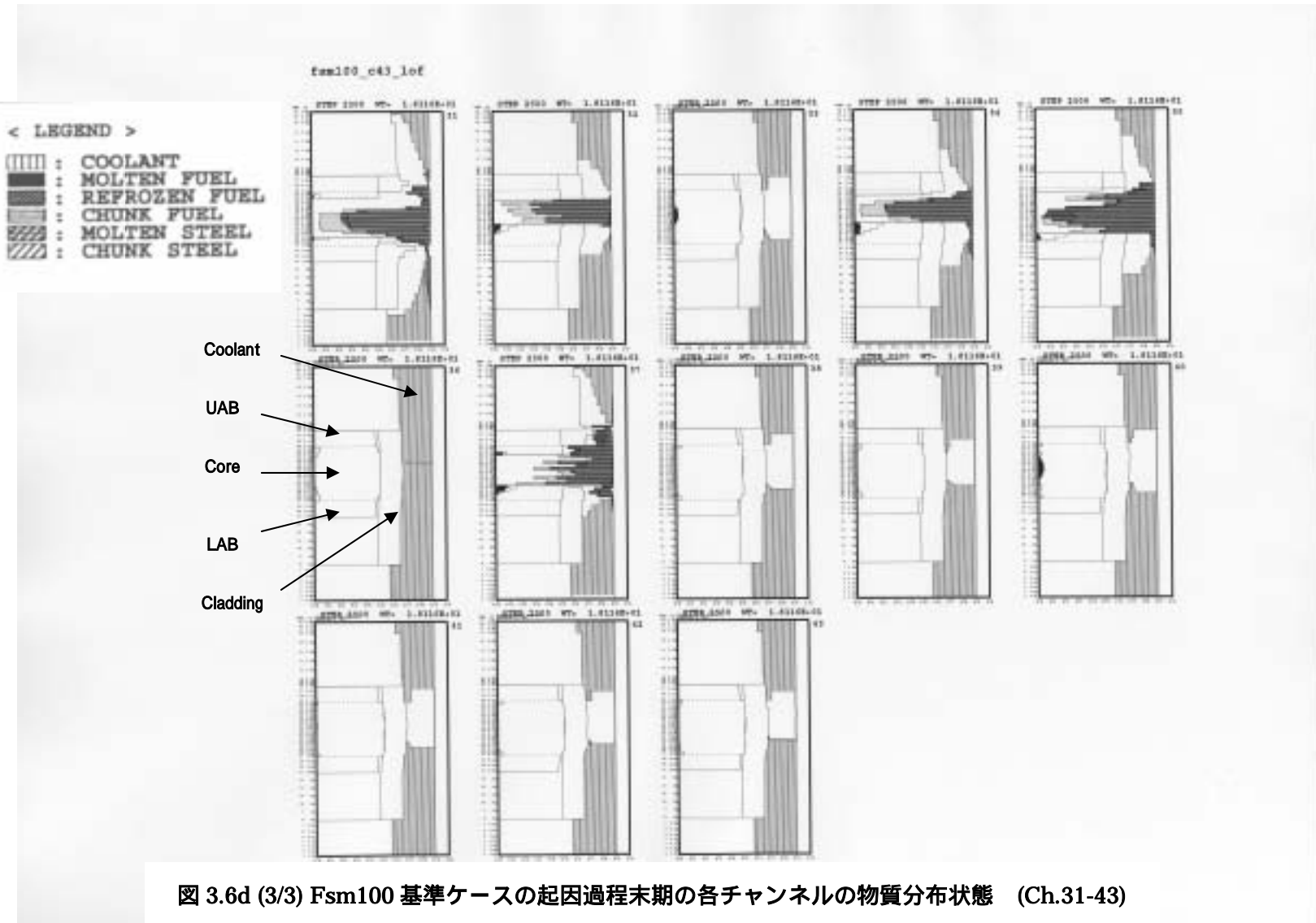


図 3.6d (3/3) Fsm100 基準ケースの起因過程末期の各チャンネルの物質分布状態 (Ch.31-43)

移動反応度、及びこれらに支配された全反応度の過渡変化を比較した。ボイド反応度、及び燃料移動反応度線上に示したマークは、チャンネル別のそれぞれ Pluto2 破損及び Levitate 破損発生タイミングを示している。パラメータとしたボイド反応度ワースの増加に伴って Pluto2 破損発生後のボイド反応度挿入率が顕著に増大している。ボイド反応度挿入を相殺する即応的な負の反応度は Doppler と燃料軸方向膨張反応度であるが、全反応度が 1\$ に近接し多くの炉心燃料が溶融遷移状態にある状況下では、その挿入率は高々 -20\$/s であるため、ボイド反応度挿入率が 20\$/s を超過すると、この時点で負の燃料分散反応度挿入が大きな挿入率に達していない限り即発臨界超過の可能性が生じる。1.5 倍ケースでは燃料分散反応度挿入が始まる前に、典型的な LOF-drive-TOP 型の即発臨界超過が起きている。しかし、ボイド反応度ワースの設計評価不確かさは 2 で  $\pm 20\%$  であるから、この不確かさ範囲では即発臨界超過は起こらないと結論できる。

表 3.1 で Fsm80 炉心のボイドワースパラメータケースの結果は、47 チャンネルモデルケースでは、Fsm100 炉心ケースと同様の傾向となっているが、68 チャンネルモデルケースでは 1.2 倍(ボイドワース 5.9\$相当)ケースが即発臨界超過となった。これら二つのチャンネルモデルで計算された燃料分散反応度挿入挙動の小さな違いがボイドワース依存性の違いをもたらしている。また、Fsm80 炉心の Doppler 係数は Fsm100 炉心の約 90%の大きさだが、これが Fsm80 炉心のボイド反応度不確かさに対する裕度を小さくしている。

#### (b) Doppler 係数減少ケース

炉心設計では Doppler 係数評価の設計不確かさは 2 値で 15%としている。ここでは、Fsm100 及び Fsm80 炉心の基準ケースに対して、Doppler 係数ノミナル値に一律 0.8 を乗じたケースの ULOF 解析を実施した。結果の要約を表 3.1 に含めた。Fsm80 炉心ケースの炉出力・全反応度及び燃料温度反応度挿入率を基準ケースと比較して図 3.10a, 3.10b に示した。出力バーストの規模は Doppler 反応度効果の減により基準ケースよりも厳しくなっているが、全反応度の最大値は 0.98\$止まりで即発臨界超過は起きていない。Fsm100 炉心ケースも同様である。

#### (c) 炉心初期出力を 20%下げたケース(Case Pd2)

UPL120 炉心のノミナルケースが即発臨界超過となった原因の一つが、炉心の比出力密度が従来炉心に比べて約 1/2 と低いことにある。そのため Fsm100 炉心では比出力密度(43 kW/kg-MOX)を UPL120(31 kW/kg-MOX)よりも約 40%弱上げた仕様となっている。この比出力密度増加効果を確認するために、Fsm100 炉心の定格炉出力を仮想的に 20%下げた場合を想定して ULOF 計算を実施した。

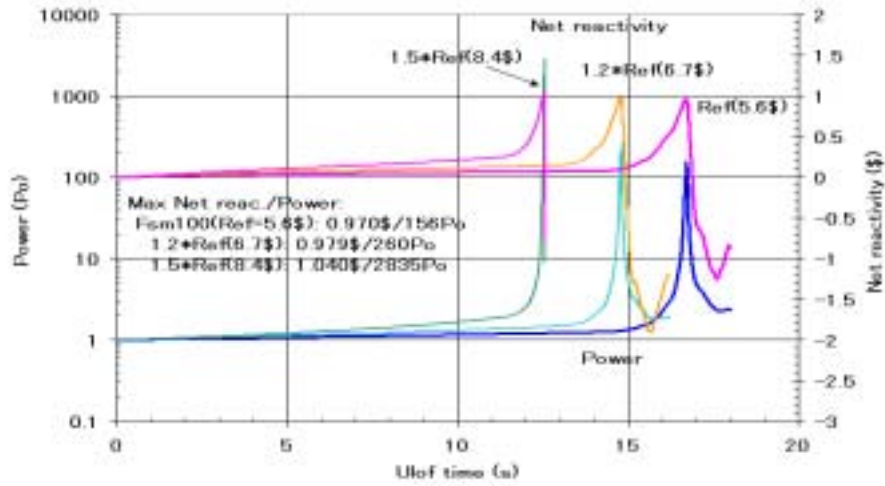


図3.7 Fsm100/ Ref vs. ボイドワース増ケース - 炉出力と全反応度

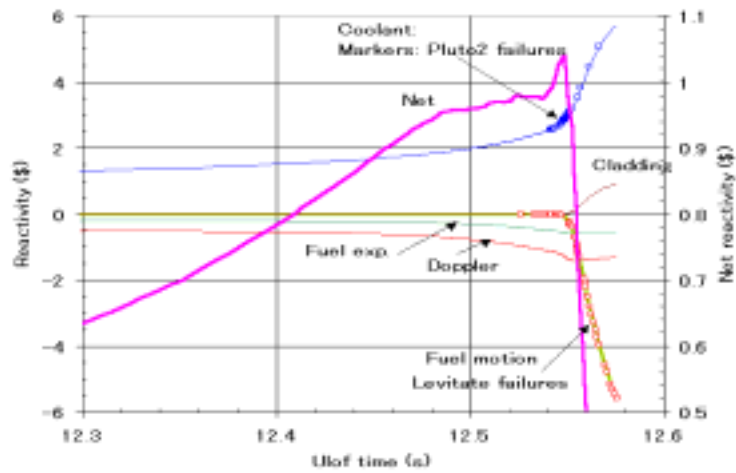


図3.8a Fsm100/ボイドワース = 8.4\$ - ULOF後半の反応度

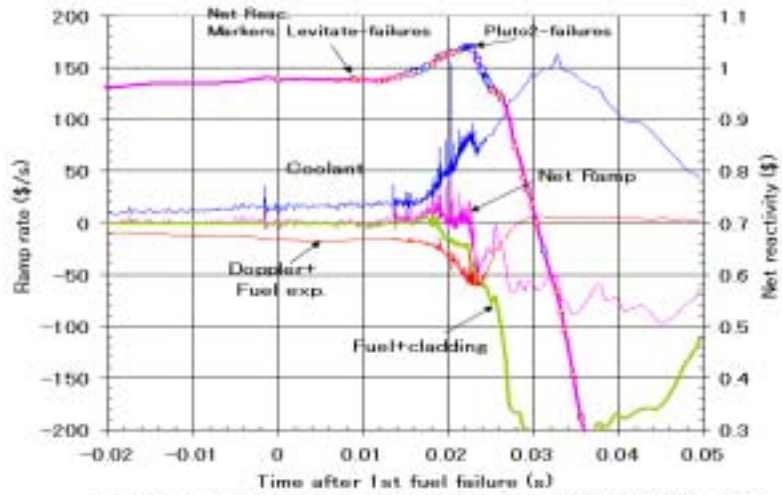


Fig.3.7c Reactivity ramp rate/Fsm100(78chm)/Void=1.5\*Ref=0.4\$

図3.8b Fsm100/ボイドワース = 8.4\$ - 反応度挿入率

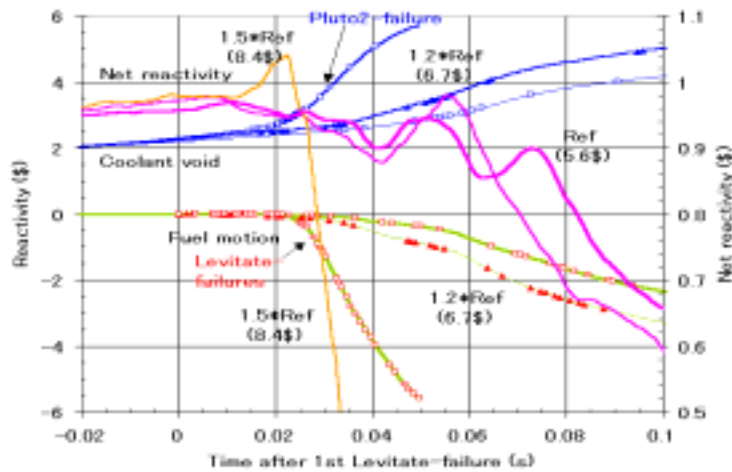


Fig.2a Net, coolant, and fuel reactivity/Fsm100(78chm)/Parameter=Void worth

図3.9 Fsm100/Ref vs. ボイドワース増ケース  
炉出力、反応度(全反応度/ボイド/燃料移動)

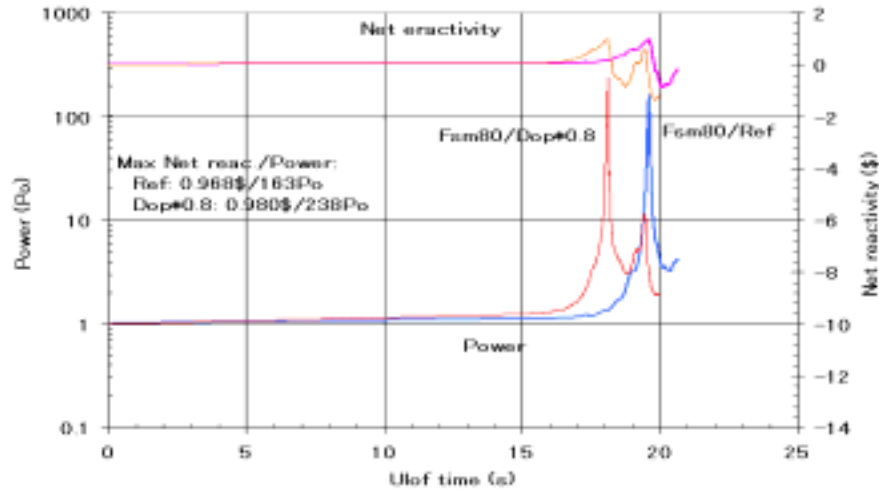


Fig.10a Power and net reactivity/Fsm80 Ref vs. Dop#0.8

図3.10a Fsm80/ Ref vs. Doppler係数20%減ケース - 炉出力と全反応度

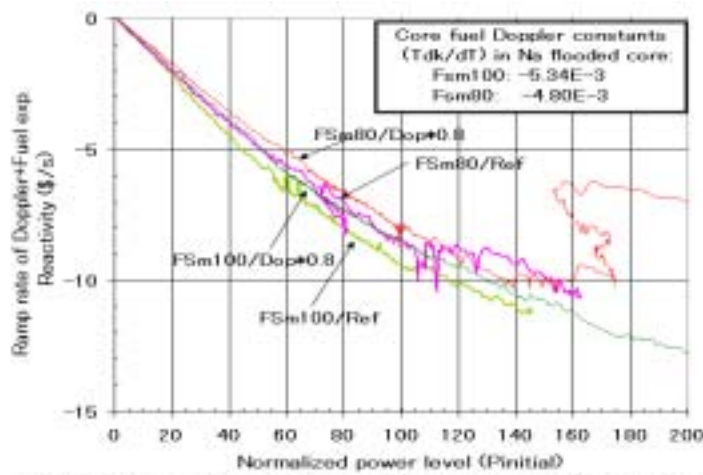


Fig.3.10b Comparison of ramp rates of (Doppler+Fuel exp.) reactivity vs. Power

図3.10b 炉出力上昇に対する燃料温度反応度挿入率の比較  
基準ケースとDoppler係数20%減ケースの比較

### [ 解析条件と定常計算結果 ]

この解析では以下の条件設定を行った。

- 1) 定格炉出力を Fsm100 炉心の 80%に下げた
- 2) 炉心出口冷却材温度を基準ケースと合わせるために冷却材流量を定格値の 80%に下げた
- 3) 燃料の燃焼度を基準ケースと合わせるために 1 サイクル長さを 20%増加した

この条件設定で炉心の平均比出力密度は基準ケース(43 kW/kg)よりも 20%下が  
り 34.4 kW/kg となる。しかし、燃料線出力を一律 20%下げたために定格運転時  
の炉心平均燃料温度が約 100K 低下している。平均比出力密度を 34.4 kW/kg ま  
で下げた本来の設計では線出力は Fsm100 基準炉心より 20%まで低い設計とはな  
らないだろう。また、上記の条件設定 1)及び 2)は初期条件としては 80%部分負  
荷状態からの ULOF ケースに相当するが、前照射期間中の燃料温度が長期間にわ  
たって約 100K 低い運転条件は燃料ミート内の FP ガス保持量を大きくするため、  
部分負荷運転状態からの ULOF 条件とは異なるであろう。

図 3.11a、3.11b に基準ケース(Ref/43chm)と低出力密度ケース(Pd2 と略記)  
の初期燃料温度(軸方向ピーク出力ノード)と FP ガス放出率を比較した。ケース  
Pd2 では 20%の線出力低下で燃料中心温度は基準ケースよりも約 200K 低下して  
いる(燃料ペレットの径方向平均温度はほぼ(中心温度+表面温度)/2 となるから  
炉心平均で約 100K 低くなる)。燃料温度低下で FP ガス放出率も小さくなって  
いる。ケース Pd2 の初期炉心燃料平均温度は約 1210K で、比出力密度に近い UPL120  
炉心の 1230K よりも約 20K 低い。これらの結果は 43 チャンネルモデルの結果で  
あるが、78 チャンネルモデルの場合でも同様の違いがみられる。

### [ Fsm100 炉心ケース ]

過渡計算結果を表 3.1 に示した。Fsm100 炉心ケースは二つのチャンネルモデ  
ルケースともに、Pd2 ケースは即発臨界超過となった。

図 3.12a、3.12b に基準ケース(78 チャンネルモデルケース)と Pd2 ケースの炉  
出力及び全反応度の過渡変化を示した。初期炉心燃料温度が低くなった Pd2 ケ  
ースの最初の冷却材沸騰開始は基準ケースよりも約 1.2 秒遅くなっている。Pd2  
ケースは即発臨界超過の出力バーストとなった。全反応度を 1\$以上に持ち上げ  
たのは多数の未・部分沸騰チャンネルでの燃料破損(Pluto2 破損)による FCI に  
よって生じたランプレートの高い(30\$/s)ボイド反応度挿入である。基準ケース  
でも Pluto2 破損によるランプレートの高いボイド反応度挿入は起きているが、  
その時点にはこれを相殺できる負の燃料分散反応度挿入があったため、即発臨  
界超過とはなっていない。図 3.13 にその模様を示した。図 3.13 によるとケー

ス Pd2 の燃料崩壊チャンネルの燃料分散反応度挿入が基準ケースに比べて遅れてはいない。最初の燃料破損(Levitate 破損)はいずれのケースでも Ch.1 で起きているが、図 3.12b を参照すると、破損時の炉出力レベルは基準ケースが約 100Po であるのに対して、ケース Pd2 では 140Po となっている。また、最初の Pluto2 破損発生は、基準ケースは 115Po(Ch.18 が破損)で、Pd2 では 240Po(Ch.9 が破損)となった。ケース Pd2 の初期燃料温度が中心温度で 200K 低かったことがこの燃料破損出力レベルの違いをもたらしている。このようにケース Pd2 の燃料破損時の出力レベルが基準ケースに比べて顕著に高くなったため、基準ケースに比べて同時性の高い Pluto2 破損が多数のチャンネルで発生し、ランプレートの高いポイド反応度挿入を引き起こしている。これらの挙動は 43 チャンネルモデルによる計算結果でも同様となっている。

### [ Fsm80 炉心ケース ]

過渡計算結果を表 3.1 に示した。Fsm80 炉心ケースでは、47 チャンネルモデルケースでは Pd2 ケースは即発臨界超過となった。68 チャンネルモデルケースでは、Pd2 ケースは基準ケースよりも規模の大きな出力バーストとなったが、即発臨界以下に収まっている。

図 3.14a に基準ケース(47 チャンネルケース)と Pd2 ケース(47 チャンネルケース)の炉出力及び全反応度の過渡変化を示した。図 3.14b に全反応度を支配した両ケースのポイド反応度及び燃料移動反応度を比較した。図から Fsm80 炉心ケースでは Pd2 ケースの全反応度を 1\$以上に持ち上げたのは、直接には、Pd2 ケースの負の燃料移動反応度挿入が一時的に停滞したことである(図 3.14b で 80ms ~ 100ms の時間帯)。最初の燃料破損発生以降のポイド反応度増分は両ケースでほとんど一致している。即発臨界を超過しなかった 68 チャンネルモデルケースでもこれらの反応度挙動は同じであった(図 3.14c)。この点は Fsm100 炉心ケースとは異なる結果である。

これらの結果から、Fsm100 及び Fsm80 炉心ケースともに炉心の平均比出力密度を基準ケースの 43 ~ 44kW/kg から 34 kW/kg まで下げると即発臨界超過を起こすことが結論でき、炉心燃料の比出力密度が重要な設計パラメータであることが分かる。なお、ケース Pd2 は、前述のように前照射期間中の平均燃料温度が基準ケースに比べて約 100K 低いため、燃料ミート内の FP ガス保持量が大きく、部分負荷運転状態からの ULOF 事象とは厳密には異なるが、両炉心のケース Pd2 の結果は部分負荷運転状態からの ULOF 事象が、定格運転状態からのそれに比べて起因過程の出力バーストが相対的に厳しくなる可能性があることを示唆している。

### 3.3 結果の考察と検討

冷却材ボイド反応度ワースが 5~6\$を有する炉心の ULOF 起因過程の出力バーストの規模は、冷却材沸騰ボイド反応度により全反応度が 1\$に近接し、100Po オーダーの高い出力状態で最初の燃料破損が発生した後 50ms から 100ms 以内に起きる負の燃料分散反応度挿入と正のボイド反応度挿入挙動の競合で決まる。燃料破損開始後の炉心では燃料の溶融遷移が起きるため、即応的な Doppler 反応度挿入にはブレーキがかかり、何らかの原因で負の燃料分散反応度挿入が遅れると、冷却材が部分・未沸騰集合体の燃料破損によって発生する溶融燃料と冷却材の熱的相互作用(FCI)による高い挿入率のボイド反応度によって全反応度が 1\$を超過する可能性がある。前節までの記述は、このような短時間の燃料破損挙動を SAS4A コードで予測した結果である。計算モデルの妥当性が第一に問われる。

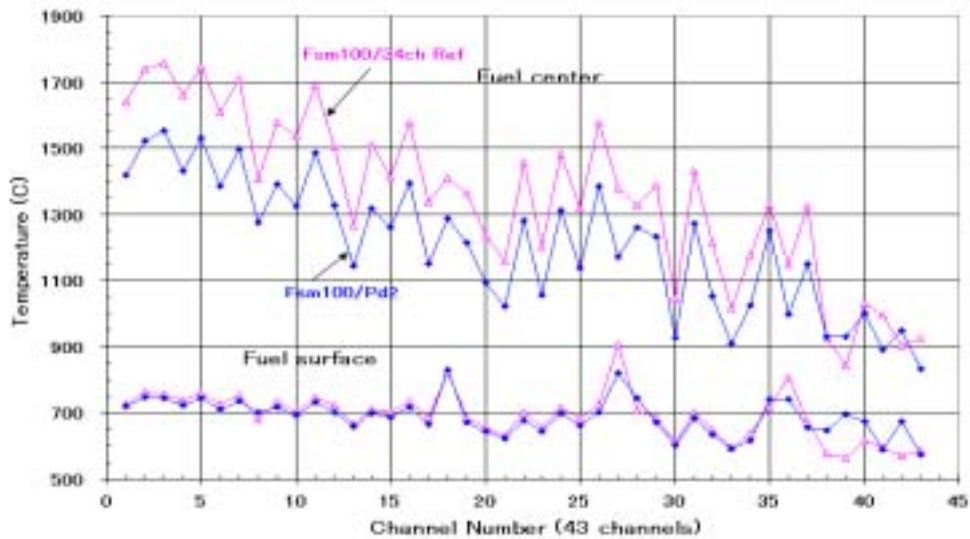


Fig.3.7a Fuel temperature : Fsm100/43ch Ref vs. Pd2

図 3.11a Fsm100炉心チャンネルピーク線出力ノードの燃料温度 Fsm100/Ch.43 Ref vs. Pd2



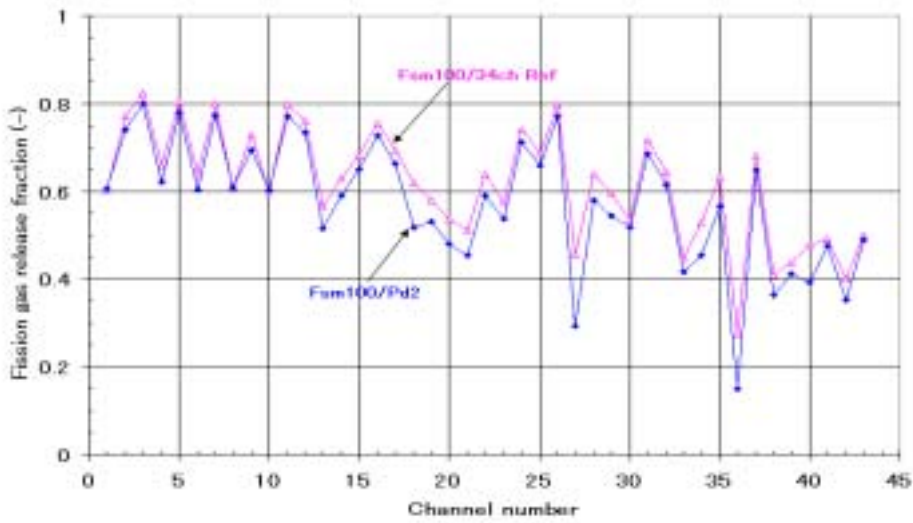


Fig.3.7b: Fission gas release of fuel pins: Fsm100 43ch Ref vs. Pd2

図 3.11b Fsm100炉心前照射期間中の燃料ピンFPガス放出率  
Fsm100/Ch.43 Ref vs. Pd2

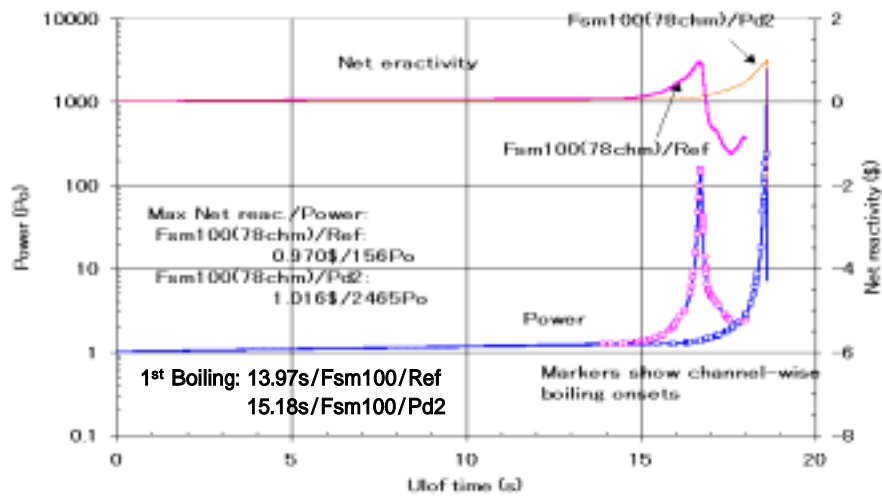


Fig.1a Power and net reactivity/Fsm100/Ref vs. Pd2

図3.12a Fsm100/Ref vs. Pd2 - 炉出力と全反応度

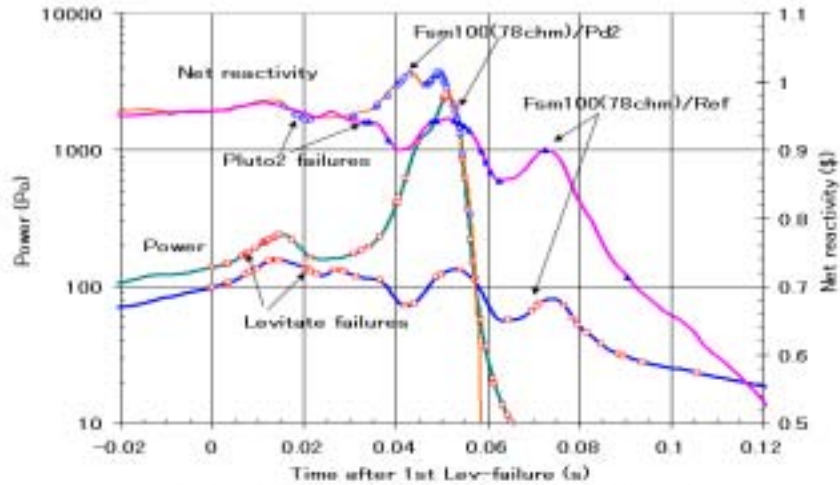


Fig.3.12b Power and Net reactivity as function of tLev (t)

図3.12b Fsm100/Ref vs. Pd2 - 炉出力と全反応度

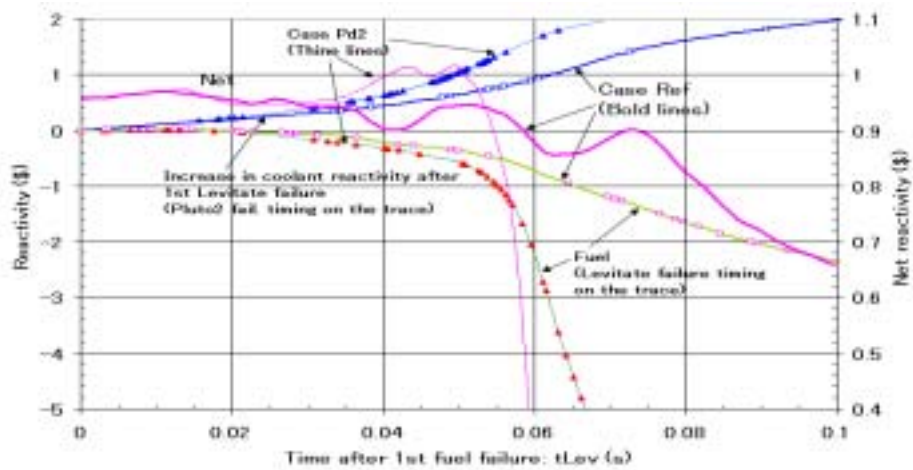


Fig.3.13 Coolant, fuel, and net reactivity: Fsm100 (78chm)/Ref vs. Pd2

図3.13 Fsm100 (78chm)/Ref vs. Pd2  
燃料破損後の燃料、冷却材反応度増分と全反応度

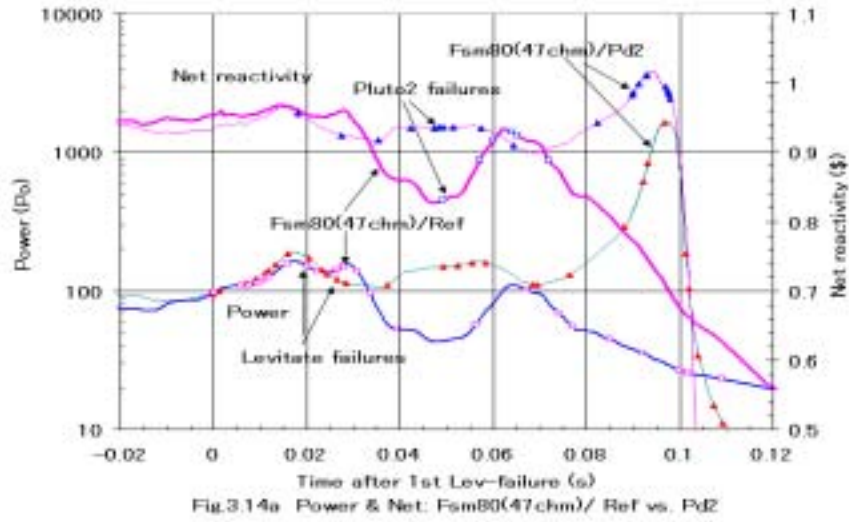


図3.14a Fsm80/Ref vs. Pd2 - 炉出力と全反応度

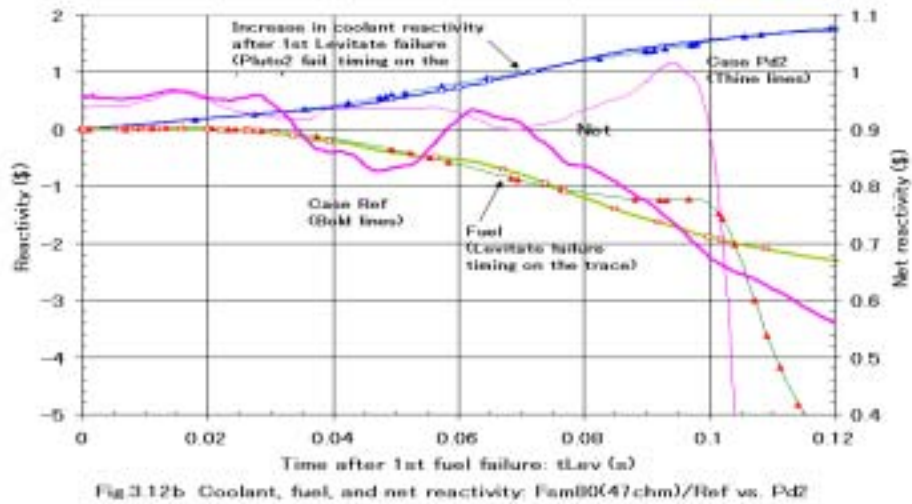


図3.14b Fsm80 (47chm)/Ref vs. Pd2  
燃料破損後の燃料、冷却材反応度増分と全反応度

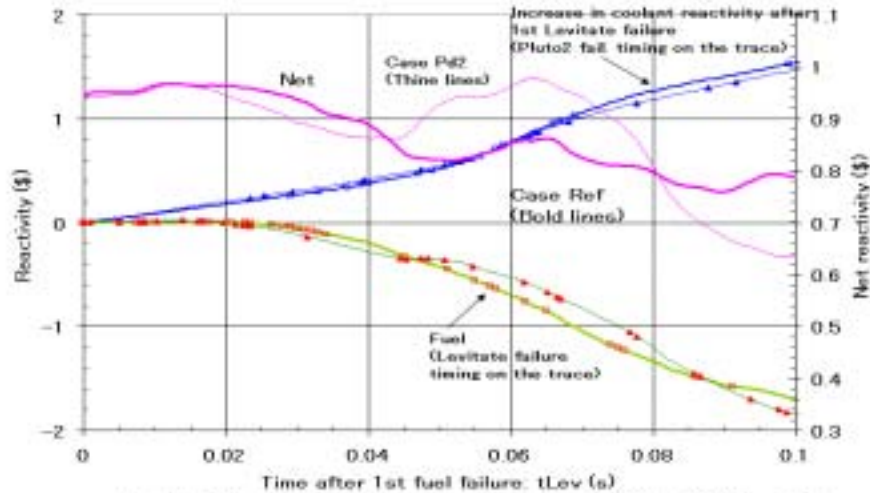


Fig 3.14 Coolant, fuel, and net reactivity: Fsm80(68chm)/Ref vs. Pd2

図3.14c Fsm80 (68chm)/Ref vs. Pd2  
燃料破損後の燃料、冷却材反応度増分と全反応度

#### (1) SAS4A 計算モデルの検証性

解析評価に適用した SAS4A コードは CABRI 炉内試験等でその計算モデルの妥当性が検証されている [6,7]。しかし、検証に使用された試験データベースは、試験燃料ピン直径は最大 8.5mm まで、燃焼度は最大 12 at.% までのものである。従って、ここで検討した実機燃料の設計仕様(ピン径 10mm ~ 11mm、ピーク燃焼度最大 20 at.%)と比較すると、燃料ピン径が検証試験データベース(定常照射挙動及び過渡燃料破損挙動に関わるデータ)の範囲を超えている。今回の解析は、SAS4A の燃料破損モデルが詳細な機構論的モデルであることから、データベースからある程度外挿した範囲までの妥当性を期待して適用したことになる。太径燃料ピンの試験データは無いが、理論的な考察により太径燃料ピンの破損挙動がどのようになるかの検討は可能であり、現在その検討を進めている。

#### (2) 安全特性の炉心燃料平均比出力密度依存性

本解析・評価の結論として、比出力密度の低い炉心ほど ULOF 時の出力バーストの規模が大きくなり、高転換型炉心設計で指向している低比出力密度は ULOF 起因過程シナリオを即発臨界超過に導く可能性があることを示した。この結論の妥当性は、2.1 節で検討した炉心設計仕様と安全特性の関係から示せるた

め、ここでは繰り返さない。

### (3) 安全性特性と炉心長の関係

これに関しても 2.1 節で言及したが、軸方向炉中心近傍で崩壊型燃料破損が発生してから顕著な負の燃料分散反応度挿入が始まるには、燃料崩壊領域が炉心上端部まで拡大する必要がある。これは、炉中心部の崩壊した燃料が圧力の発生を待って軸方向上下へ分散移動する場合、移動先の領域が未崩壊状態にあると、流路の抵抗が大きく、分散移動が制限されるためである。一般に長尺炉心ほど、軸方向出力ピーキングは大きくなるため、ピーク線出力がほぼ同じ設計では、炉心上下端部の線出力は長尺炉心ほど低くなる。従って、長尺炉心では上下端部の初期燃料温度も低く過渡時の温度上昇も遅れ、さらに、長尺である分も加わって、燃料崩壊領域の軸方向拡大が遅れる。これらはすべて、負の燃料分散反応度挿入タイミングの遅れにつながり、CDA 時の安全特性としては好ましくない。

## 4. 結論

実用化戦略調査研究(FS)のナトリウム冷却混合酸化物(MOX)燃料高速炉の力テゴリーで設計検討が進められている高転換型中型炉のULOF起因過程の特徴を、安全解析コードSAS4Aを適用して把握した。安全設計の観点からは、炉心設計では炉心損傷事象(CDA)を想定した場合に「再臨界排除」を達成する必要がある。「再臨界排除」達成のためにはCDAの代表事象であるULOF事象の初期の過程(起因過程)で生じる「炉出力バーストの規模を比較的穏やかなものに抑える」必要があり、起因過程がノミナル条件下、及び主要な設計因子の不確かさの範囲内で、全反応度が1\$を超過する(即発臨界超過)シナリオとはならないことが示されれば、この要求条件は満たされるとして、解析・評価を実施した。

炉心の燃料体積割合を増加して高内部転換比を達成すべく、太径燃料ピンを採用した炉心設計では、燃料の平均比出力密度が従来炉心に比べて低くなる。最初(平成13年度)に提案された上部ナトリウムプレナム付き炉心長1.2mの中型炉(UPL120)では、平均比出力密度は約31kW/kg-MOXとなり、従来大型炉心の53~66kW/kg-MOXに比べて著しく低い。UPL120炉心のボイド反応度ワースは、上部ナトリウムプレナムの-1\$のボイドワースを有効として、安全設計の要求条件である約5\$~6\$以下(炉心部は6\$)を満たしている。

解析結果以下の結論を得た。

(1) UPL120炉心のULOF起因過程は、ノミナル条件下で即発臨界を僅かに超過する出力バーストとなった(全反応度及び炉出力最大値：1.006\$、定格出力の約940倍)。この炉心のULOF起因過程が即発臨界を超過する出力バーストとなった主要な原因は以下の通りである。

- (a) 炉心の比出力密度が約31kW/kg-MOXとなり、従来大型炉心の53~66kW/kg-MOXに比べて著しく低く、そのため出力上昇時の負の即応的フィードバック反応度(Doppler+燃料軸方向膨張反応度)による出力上昇の抑制が、従来炉心に比べて弱くなる。
- (b) 炉心長が、従来大型炉心の1mに対して、1.2mと長尺であり、そのため炉心上端部の線出力が低くなる。その結果、ULOF時ボイド化した燃料集合体の燃料破損後の軸方向燃料分散負反応度の挿入が1m炉心に比べて遅れる。また、比出力密度が低いこともこの遅れの原因となっている。

(2) UPL120炉心のULOF起因過程の解析結果を踏まえて、比出力密度を43~44kW/kgまで増加し、炉心長を1m及び0.8mとした二つの高転換型中型炉Fsm100及びFsm80炉心の設計が平成14年度に提案された。これらの炉心のULOF起因過程結果は以下の通りである。

(a) ノミナル条件下では出力バーストは即発臨界以下のマイルドな挙動となる。全反応度及び炉出力最大値は以下の通り。

Fsm100 炉心 : 0.97\$, 定格出力の約 160 倍

Fsm80 炉心 : 0.97\$, 定格出力の約 170 倍

(b) ボイド反応度ワース及び Doppler 係数の設計評価不確かさの 2 幅(それぞれ  $\pm 20\%$  及び  $\pm 15\%$ )を保守側に考慮しても、出力バーストは幾分厳しくなるが、即発臨界以下のマイルドな挙動となり、ULOF 起因過程は遷移過程へ移行する。

(c) Fsm100 及び Fsm80 炉心ケースともに、炉心の初期出力を 20%下げ状態を想定し、燃料の平均比出力密度を基準ケースの 43 ~ 44kW/kg から 34 kW/kg まで下げた条件で前照射解析を実施(但し、出力/流量比とピーク燃焼度を保存)して ULOF の初期条件を設定すると、これらの ULOF 起因過程は、いずれの場合もノミナル条件下で即発臨界超過の出力バーストとなる。

(3) これらの結果から、これまで安全設計要求条件としては特に取り上げていなかった炉心燃料の平均比出力密度は重要な設計パラメータであり、今後の高転換型炉心設計では、上記の結果を踏まえた炉心仕様に基づく検討が必要である。

なお、本検討で使用した SAS4A コードモデルの検証データベースの範囲は、ピン径が 8.5mm、ピーク燃焼度が 12at.%までの試験燃料による安全性試験データ(CABRI 試験等)に基づくものであり、ピン径 10mm ~ 11mm、ピーク燃焼度 20at.%である今回の解析対象はデータベースの範囲を明らかに超えている。このため、SAS4A コードによる予測の不確かさの評価が必要であり、また、解析対象燃料の仕様をカバーする試験データの取得が望まれる。

## 記号表

ABLE:	Axial blanket-less fuel assembly
CDA:	Core disruptive accident
Cp:	Specific heat of fuel (J/kg)
CpMo:	Total heat capacity of core fuel mass Mo (J/K)
FAIDUS:	Fuel assembly with inner-duct structure
FCI:	Fuel coolant interaction: thermal interaction between molten fuel and liquid coolant
fps:	Full-power-second: a normalized energy release (time-integral of normalized reactor power P(t))
KDop+Kfuel :	Absolute value of fuel temperature reactivity coefficient, which is sum of reactivity due to Doppler effect and axial fuel expansion (\$/K)
Levitate failure:	Disruption-type fuel failure in coolant-voided fuel assembly predicted by the LEVITATE model of the SAS4A code.
LOF-driven-TOP	Transient overpower phenomenon driven by positive coolant void reactivity insertion in loss-of-flow event.
P/F:	Power-to-coolant flow ratio (MW/kg/s = MJ/kg sodium)
Pluto2 failure:	Burst-type fuel failure in non-voided or partially voided fuel assembly predicted by the PLUTO2 model of the SAS4A code.
Po:	Initial reactor power level (Assumed to be a design rated power)
P(t):	Normalized transient reactor power with initial power level=1.0
ULOF:	Unprotected loss of flow accident (Loss of core coolant flow accident without reactor scram)
Ulof time:	Time since start of ULOF event
/ t:	Time derivative of reactivity: reactivity ramp rate (\$/s)



## 謝辞

本報告に記述した SAS4A コードによる ULOF 起因過程の解析の実施においては、原子力システム株式会社 (NESI) の佐藤睦和氏及び高橋一彦氏が多数ケースの SAS4A コードによる計算作業を担当され、協力を頂いた。ここに両氏に対して謝意を表します。

## 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 幅広い技術選択肢の検討 ”, JNC TN9400 99-080 (October 1999).
2. 三原隆嗣 他、”FBR システム技術検討書 - 平成 11 年度報告 - ”, JNC TY9400 2000-024 (June 2000).
3. ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 - 酸化物燃料炉心 - 、JNC TN9400 2002-065、2002 年 12 月.
4. 実用化戦略調査研究 (Na 冷却高速炉) - 高内部転換型均質炉心の概念検討 - , to be published.
5. A.M. Tentner, et al., “The SAS4A LMFBR Whole Core Accident Analysis Code,” Proc. It. Mtg. on Fast Reactor Safety, Knoxville, Tennessee, Vol.2, pp.998 (April 1985).
6. I. Sato and Y. Onoda, “Interpretation of the CABRI LT1 test with SAS4A-code analysis,” JNC TN9400 2001-048 (March 2001).
7. S. Suk and I. Sato, “Interpretation of the CABRI LTX Test using the SAS4A Code,” JNC TN9400 2001-115 (October 2001).