



JAEA-Research

2007-025



JP0750157

加速器駆動炉の出力分布平坦化のための核設計

Neutronics Design for Power Flattening of Accelerator-driven System

岩永 宏平 西原 健司 辻本 和文 倉田 有司 大井川 宏之

Kohei IWANAGA, Kenji NISHIHARA, Kazufumi TSUJIMOTO
Yuji KURATA and Hiroyuki OIGAWA

原子力基礎工学研究部門
核変換工学技術開発グループ

Nuclear Transmutation Technology Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

加速器駆動炉の出力分布平坦化のための核設計

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門

核工学・炉工学ユニット

岩永 宏平, 西原 健司, 辻本 和文⁺, 倉田 有司, 大井川 宏之

(2007年1月19日受理)

マイナーアクチニド (MA) 核変換による高レベル放射性廃棄物の処理・処分の負担軽減を目的として、日本原子力研究開発機構では加速器駆動システム (ADS) の研究開発を行っている。ADS は炉心中心で大強度の陽子加速器による核破砕中性子の供給を受けているため、炉心中心部分に高い出力ピークを持つ。このことは、燃料被覆管表面の最高温度が高くなる要因となるため、高温における腐食性の高い鉛ビスマス熔融金属 (LBE) 冷却材を使用する際の課題となっている。本研究では、出力ピーク低減を目的としたいくつかの炉心設計手法を検討し、それぞれの被覆管温度低減効果とビーム電流に対する影響を示した。手法として、燃料希釈材割合のサイクル毎の調整、燃料希釈材含有量、プルトニウム富化度、またはピン径の調整による炉心多領域化、ビーム入射位置の変更、そして、中央燃料集合体の短尺化を検討した。その結果、燃料希釈材割合のサイクル毎の調整と希釈材含有量またはピン径についての多領域化を組み合わせることで、被覆管表面最高温度を従来設計に比べて最大 110℃低減可能であることなどを示した。

Neutronics Design for Power Flattening of Accelerator-driven System

Kohei IWANAGA, Kenji NISHIHARA, Kazufumi TSUJIMOTO⁺,
Yuji KURATA and Hiroyuki OIGAWA

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 19, 2007)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) promotes research and development of Accelerator-Driven System (ADS) to reduce the burden for conditioning and disposal of the high-level radioactive waste by transmuting minor actinide (MA). Since spallation neutrons are supplied to ADS by a high-power proton accelerator at the center of the core, there is a high power peak near the center. The power peak raises the maximum temperature at the surface of cladding tubes and is one of technical challenges to use lead-bismuth eutectic (LBE) as coolant, because LBE is corrosive at high temperature. In the present neutronics design, we investigated several methods to reduce the power peak, and showed the reduction of the temperature of cladding tubes and the influence of such design modification to the required beam current. These methods are adjustment of inert matrix content in fuel in each burn-up cycle, multi-region design in terms of plutonium enrichment, pin radius and inert matrix content, and modification of the level of the beam window position and the height of the central fuel assemblies. As the result, the maximum temperature at the surface of fuel cladding tubes can be reduced by 110 °C by combining the adjustment of inert matrix content in each burn-up cycle and multi-region design in terms of pin radius or inert matrix content.

Keywords: Transmutation, Accelerator-driven System, ADS, Power Flattening, Multi-region Core, Power Peaking, Lead-bismuth Eutectic, Clad Temperature, Sub-criticality

⁺Policy Planning and Administration Department, Management Sector

目次

1	緒言	1
2	加速器駆動システムの概要	3
2.1	プラント仕様	3
2.2	燃料サイクル	3
2.3	計算コード	3
3	出力分布平坦化のための炉心設計	7
3.1	参照炉心	7
3.2	サイクル毎の燃料希釈材の調整	8
3.3	炉心多領域化	10
3.3.1	Pu 富化度による多領域化	12
3.3.2	ピン径による多領域化	13
3.3.3	希釈材割合による多領域化	18
3.4	ビーム入射位置変更	22
3.5	中央燃料集合体の短尺化	27
3.6	全体検討	32
4	結言	37
	謝辞	37
	参考文献	38
	付録 A 計算モデル	39
A.1	ジオメトリ	39
A.2	組成	40
	付録 B 被覆管表面温度評価	42

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of accelerator-driven system	3
2.1 Plant specification	3
2.2 Fuel cycle	3
2.3 Calculation codes	3
3. Reactor design for power flattening	7
3.1 Reference core	7
3.2 Adjustment of inert matrix at every cycle	8
3.3 Multi-region core	10
3.3.1 Pu enrichment	12
3.3.2 Pin radius	13
3.3.3 Inert matrix ratio	18
3.4 Position of beam induction	22
3.5 Shortening fuel assemblies near the center	27
3.6 Discussion	32
4. Conclusions	37
Acknowledgment	37
References	38
Appendices	
A. Calculation model	39
A.1 Geometry	39
A.2 Composition	40
B. Estimation of the temperature at the surface of fuel cladding tube	42

1 緒言

高レベル放射性廃棄物の処理・処分の負担軽減を目的として、日本原子力研究開発機構（原子力機構）ではマイナーアクチニド（MA）核変換を主目的とした加速器駆動システム（ADS）の研究開発を行っている¹⁾。原子力機構が提案している ADS は、大強度の陽子加速器によって高いエネルギー効率で核破砕中性子を得て、MA 窒化物を主燃料とする未臨界炉を運転する概念である²⁾。MA 燃料は核破砕ターゲットを兼ねた鉛ビスマス溶融金属（LBE）で冷却される。

ADS は従来の臨界炉心と異なり、炉心中心に強力な外部中性子源が存在するため、ターゲット近傍の燃料集合体で高い出力ピークが発生し、燃料被覆管最高温度を高くする。原子力機構では冷却材平均温度を 300/409℃（入口/出口）程度と通常の高速度炉よりも低く設定しているが、出力分布平坦化方策を行わないこれまでの設計では、被覆管表面最高温度は 600℃に達していた。すなわち、燃料を除く燃料集合体内の構造材の温度は 300℃から 600℃の範囲に亘っており、構造材料はその範囲で鉛ビスマスによる腐食と照射に耐え、健全性を保つことが必要である。現在候補材料として考えられているフェライト・マルテンサイト鋼では高温での強度面では成立性が期待できるものの、低温では照射による延性低下の面で成立性に課題がある。また、550℃以上での鉛ビスマスによる腐食を低減するためには、被覆管表面の最高温度を下げるのが有効である。従って、構造材料の設計温度範囲を小さくするために、炉心設計によって出力ピークを低減し、被覆管最高温度を低減することが望まれる。

本研究の目的は、出力ピーク低減を目的としたいいくつかの炉心設計手法を検討し、それぞれの被覆管温度低減効果とビーム電流などに対する影響を示すことである。

出力ピークを低減する手法として、まず、未臨界度の燃焼変化（燃焼反応度変化）を抑制する方策を検討した。未臨界度は 1 燃焼サイクル中のみではなく、複数の燃焼サイクルに渡って大きく変化する。出力ピーキングは、炉心の未臨界度に依存するため、想定される最大の未臨界度を小さくすることにより、出力ピーキングを抑制することができる。また、ADS の炉心出力を一定に保つためには、未臨界度に応じて加速器ビーム出力を調整する必要がある。従って、未臨界度の変動幅が大きくなると、加速器のビーム出力の調整幅が大きくなり、加速器へ要求される性能が極めて高いものになる。従って、燃焼反応度変化の抑制は、加速器の運転性能への負担を下げることにもなる。従来の設計では、ADS 新燃料製造時に一定の希釈材割合の燃料を用いているため、各燃焼サイクル初期の未臨界度が一定値になっていない。このことが燃焼末期における未臨界度を更に大きくしていた。本検討では、各燃焼サイクル初期の未臨界度が一定値となるように、各サイクル毎に燃料中の希釈材割合の調整を行った。

続いて、炉心を 2 領域化、または 4 領域化することにより、炉心中心部分の燃料を減少させ、外周部分の燃料を増加させることで、出力ピークを低減する方法を検討した。燃料

装荷量の調整のために、Pu 富化度を調整する方法、ピン径を調整する方法、及び希釈材割合を変化させる方法を試みた。また、ビーム窓の軸方向位置を変更することにより、炉心の軸方向出力ピーク位置を変化させること、あるいは、炉心中央に近い燃料を短尺化することで、被覆管最高温度の低減を試みた。

2 加速器駆動システムの概要

2.1 プラント仕様

出力分布平坦化の検討は、原子力機構においてこれまで検討されている熱出力 800MW の LBE 冷却 ADS を対象とした。炉心及び集合体の主要な仕様を表 1、表 2 に、炉心概念、集合体配置および解析モデルを図 1、図 2、図 3 にそれぞれ示した。

この ADS 設計では、主循環ポンプや蒸気発生器を内蔵したタンク型を採用している。線形加速器から送られる陽子ビームは、炉心上部からのビームダクトによって炉心中心の LBE ターゲットに導かれる。LBE ターゲットの手前にはビーム窓と呼ばれる仕切りがあり、これは、炉心発熱部上端の高さに位置している。ビーム窓は通過する陽子、ターゲットからの高エネルギー中性子、炉心からの核分裂中性子によって照射されている。ターゲット領域の LBE は、炉心部からの横流れを阻止するために、ビーム窓冷却流路案内管と呼ばれる仕切りによって炉心領域と分離されている。この案内管を核計算で模擬するために、解析モデルではターゲットと炉心の間に反射体 2 と名づけられた領域を設けた (図 3)。

MA 炉心部分は 84 体のダクトレス集合体からなる。集合体を構成する 397 本のピンのうち、6 本は構造を保つためのタイロッドである。残りの 391 本の燃料ピンには、燃料を希釈するための窒化ジルコニウムが添加されたアクチニド窒化物燃料が封入されている。燃料上部にはヘリウムを封入したガスプレナムがある。MA 炉心の外周には構造体と LBE からなる反射体領域及び、反射体にボロンを加えた遮蔽体領域が設けられている。

2.2 燃料サイクル

今回の検討に用いた ADS では、1 バッチ方式を採用している。すなわち、600 運転日毎に全ての燃料集合体を新燃料と交換する。図 4 に示すように、燃焼初期には 4.19t あったアクチニド核種が、燃焼後には 3.69t に減少している。使用済み燃料を 2 年間の冷却の後に再処理し、減少したアクチニド核種を補う 0.5t の MA を加えて新燃料とする。第 2 サイクル以降は MA のみを新燃料に加えるが、第 1 サイクルのみはプルトニウム(Pu)を添加する。これは、初期サイクルの未臨界度が大きく(深く)なり過ぎないようにするためである。

実際の再処理では Am、Cm に希土類元素が随伴するが、今回の検討では、理想的な燃料再処理を仮定し、100%のアクチニド核種が回収され、かつ、100%の FP 核種が除去されるとしている。

2.3 計算コード

文献2と同様に SLAROM³⁾、TWOANT⁴⁾、ORIGEN⁵⁾を中心とする燃焼コードシステムを用いて計算を行った。断面積ライブラリには JENDL-3.3⁶⁾を基に作成された

JAERI-Fast セット⁷⁾ (73 群) を用いた。また、核破碎中性子源の計算には NMTC/JAERI97⁸⁾を用いた。付録 A に計算体系と組成を、付録 B に燃料被覆管表面温度の計算方法を付録した。

表 1 ADS の基本仕様

項目		
プラント仕様	熱出力	800MWt
	冷却材入口温度	300°C
	冷却材流速	2m/s
	冷却材	Pb-Bi 溶融金属
	最大 keff	0.97
炉心・燃料仕様	燃料	(Pu+MA)N+ZrN 混合窒化物
	集合体タイプ	ダクトレス
外部機器	主循環ポンプ	2 基
	蒸気発生器	4 基
	崩壊熱除去系	3 系統
加速器	陽子エネルギー	1.5GeV
	核破碎ターゲット	Pb-Bi 溶融金属
核変換量	核変換量	500kgMA/Cycle
	運転期間	600EFPD/Cycle

表 2 ADS の燃料仕様

燃料	MA+Pu 窒化物
希釈材	ZrN(窒化ジルコニウム)
初期装荷 Pu 割合 (vol%)* ¹	29.3~42.4* ²
希釈材体積割合 (vol%)	50.8~77.8* ²
希釈材重量割合 (w%)	33.8~63.4* ²
燃料ペレット理論密度 (%)	90
ペレットスミア密度 (%)	85
燃料被覆管外径 (cm)	0.61~0.85* ²
燃料被覆管肉厚 (cm)	0.05
燃料被覆管ピッチ (cm)	1.148
集合体全長 (cm)	374
燃料ピン発熱長 (cm)	100
ガスプレナム長 (cm)	100
ピン配置	三角配列
燃料ピン本数/集合体	391
タイロッド本数/集合体	6
燃料集合体対面距離 (cm)	23.29
燃料集合体ピッチ (cm)	23.39
燃料集合体数 (本)	84
燃料領域等価内半径 (cm)	32.5
燃料領域等価外半径 (cm)	117.1

*¹ 重金属中に占める割合。つまり、Pu/(Pu+MA)。

*² 今回の検討で用いた範囲を示す。

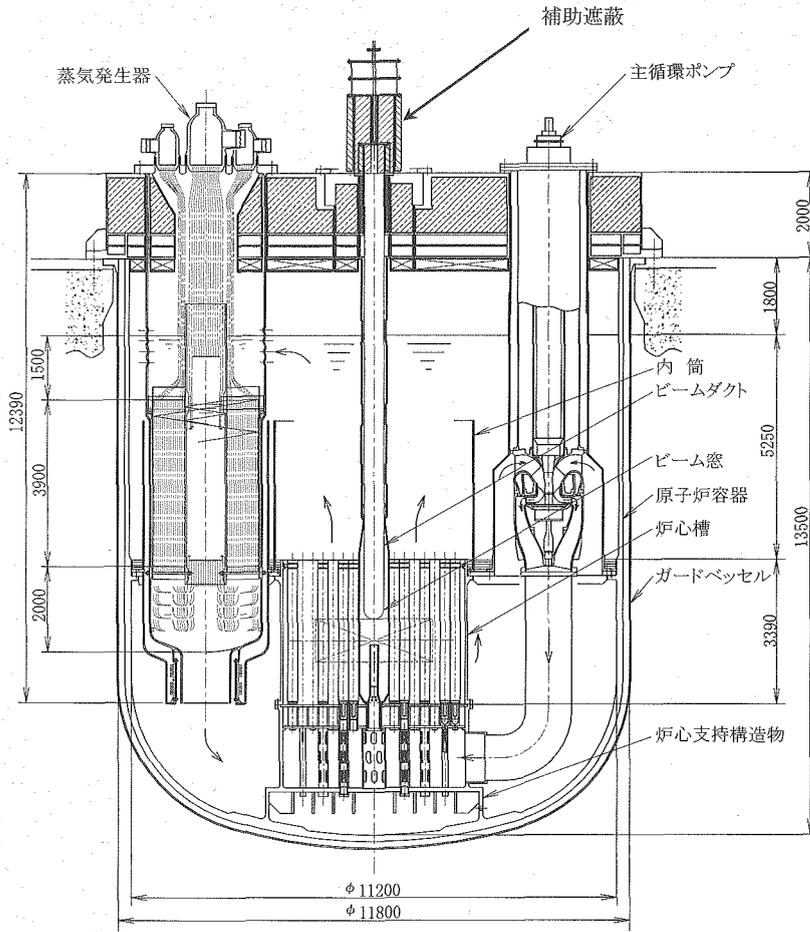


図 1 加速器駆動システム炉心概念図

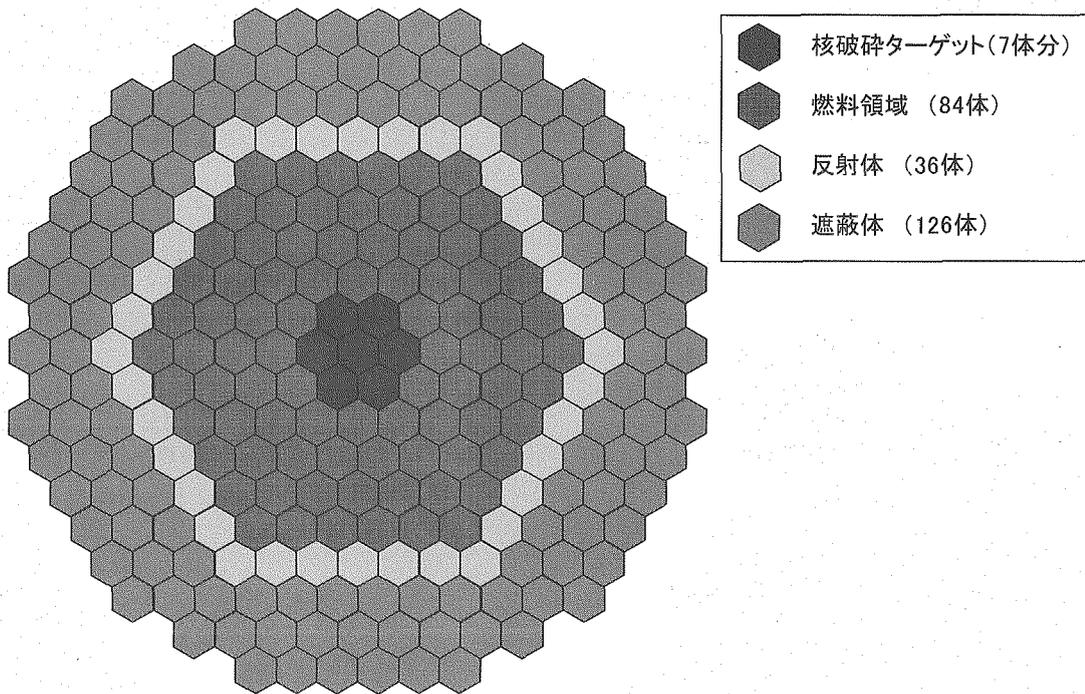


図 2 集合体配置

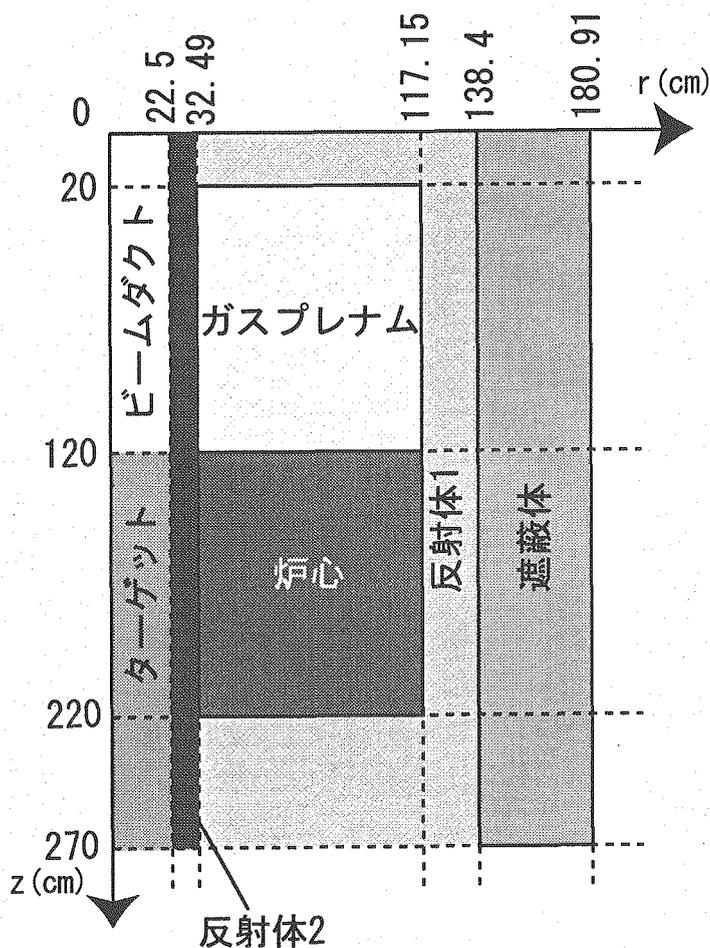


図 3 解析モデル

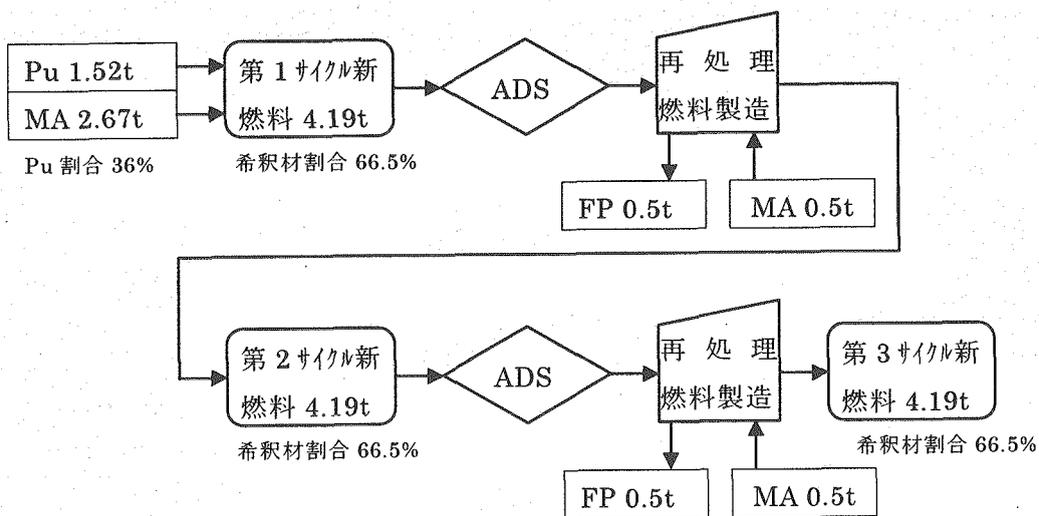


図 4 ADS 燃料サイクルのマスフロー

3 出力分布平坦化のための炉心設計

本章では、出力分布平坦化手法を説明する。表 3 に今回行った検討ケースとその略称をまとめた。

表 3 検討ケース一覧

番号	略称	概要
1	Ref	参照炉心
2	Ref-ZrA	参照炉心+サイクル毎の希釈材調整
3	Pu-2	Pu 富化度 2 領域
4	Pin-2	ピン径 2 領域
5	Pin-4	ピン径 4 領域
6	Pin-2-ZrA	ピン径 2 領域+サイクル毎の希釈材調整
7	Pin-4-ZrA	ピン径 4 領域+サイクル毎の希釈材調整
8	Zr-2	希釈材 2 領域
9	Zr-4	希釈材 4 領域
10	Zr-2-ZrA	希釈材 2 領域+サイクル毎の希釈材調整
11	Zr-4-ZrA	希釈材 4 領域+サイクル毎の希釈材調整
12	Win	ビーム入射位置-40cm
13	Win-ZrA	ビーム入射位置-40cm+サイクル毎の希釈材調整
14	Ass	中央燃料集合体 40cm 短尺化
15	Ass-ZrA	中央燃料集合体 40cm 短尺化+サイクル毎の希釈材調整

3.1 参照炉心

2章で示した炉心に対して、表 4の燃料パラメータを適用したケースを参照ケースと設定する。この炉心は 1 燃料領域であって、各燃焼サイクルの新燃料に含まれる希釈材割合が一定である炉心である。参照炉心を以降、“Ref”と呼ぶ。

図 5に Ref ケースの 10 燃焼サイクル、すなわち、6000 全出力換算日(EFPD)までの k_{eff} (実効増倍率)、ビーム電流及び、被覆管表面最高温度の計算結果を示す。表 4のパラメータのうち、希釈材体積割合と初期装荷 Pu 割合は、10 燃焼サイクル中の k_{eff} が制限値である 0.97 を超えない範囲で最大となるように設定されている。

図 5より、第 2 サイクルのサイクル終了時(EOC)、すなわち 1200EFPD に最も k_{eff} が小さくなり、ビーム電流と被覆管温度が高くなっていることが分かる。このとき、図 5 中右下図に示すように被覆管表面最高温度は炉心中央部分で 602℃に達している。一方、炉心外周部では、400~500℃となっているため、炉心多領域化による出力分布平坦化の必要性が示唆される。

表 4 Ref(参照ケース)の燃料パラメータ

希釈材体積割合(vol%)	66.5%
初期装荷 Pu 割合 (vol%)	36.2%
被覆管外径(cm)	0.765

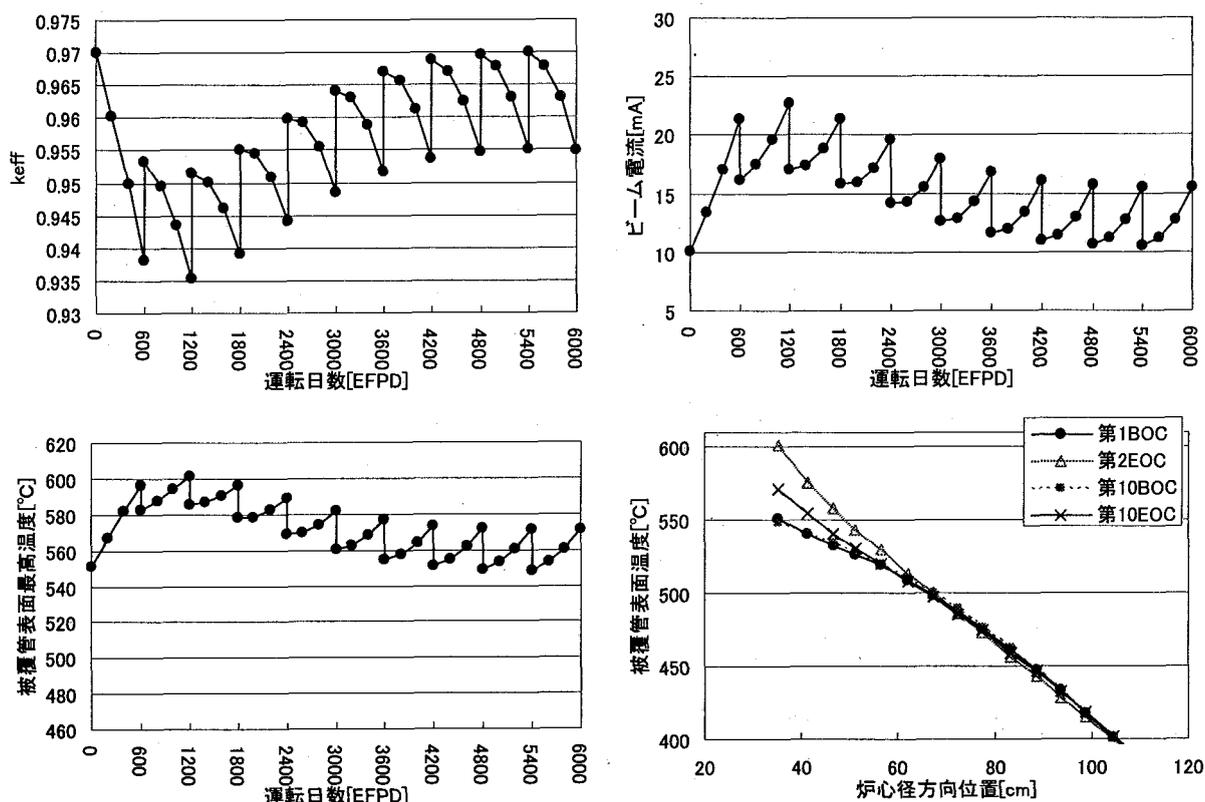


図 5 Ref(参照ケース)に対する計算結果
(左上:keff、右上:ビーム電流、左下:被覆管表面最高温度、右下:径方向温度分布)

3.2 サイクル毎の燃料希釈材の調整

Ref ケースでは全ての燃焼サイクルで同じ希釈材割合の新燃料を用いているため、全ての燃焼サイクルで同じ燃料量となっている。その結果、アクチニド組成変化の影響を受けて、前節に示すとおり、各燃焼サイクルの燃焼初期においても $k_{eff}=0.97$ になっておらず、 k_{eff} の変動幅を大きくする原因となっている。ここでは、各燃焼サイクルの新燃料毎に燃焼初期に $k_{eff}=0.97$ となるように希釈材割合を調整することで k_{eff} の変動幅を小さくすることを試みる。このケースを”Ref-ZrA”と呼ぶ。検討の結果、表 5 に示すようにサイクル毎の希釈材割合を調整することで、 k_{eff} の変動幅を小さくできることがわかった。

従来の燃料交換は図 4 のマスフローに従うが、これに対して、この方法では図 6 に示すマスフローとなる。従来は第 2 サイクル以降の新燃料に対して毎回 0.5t の MA を追加していたが、この方法ではサイクル毎に追加する MA 量が異なってくるのが特徴である。しかし、表 5 に示すように、希釈材割合は第 4 サイクル付近で平衡に達するため、第 4 サイクル以降の MA 追加は従来の方法と同じく 0.5t 付近となる。第 1 サイクル後の再処理において、MA が 0.01t 余剰している。この余剰 MA は後のサイクルで燃料として扱われると考えられるが、この計算では無視されている。余剰 MA は僅かであるため、影響は小さい。

Ref-ZrA ケースに対する計算結果を図 7に示す。参照炉心に対して keff 変動幅が大きく改善されていることが分かる。それによって、第 2 サイクル EOC のピークが無くなり、Ref ケースでは 602℃であった被覆管表面最高温度が 570℃まで低減されている。また、最大ビーム電流が 22.7mA から 15.7mA まで低減されている。

この方法は、後述する多領域化等の手法に対しても組み合わせることができる。以降の検討では、ほぼ全てのケースに対して希釈材調整ありと無しのケースを比較検討する。

表 5 Ref-ZrA(参照+希釈材調整ケース)の燃料パラメータ

希釈材体積割合(vol%)	第 1 サイクル	60.5%
	第 2 サイクル	64.5%
	第 3 サイクル	65.7%
	第 4~6 サイクル	66.6%
	第 7~10 サイクル	66.9%
初期装荷 Pu 割合 (vol%)		30.3%
被覆管外径(cm)		0.765

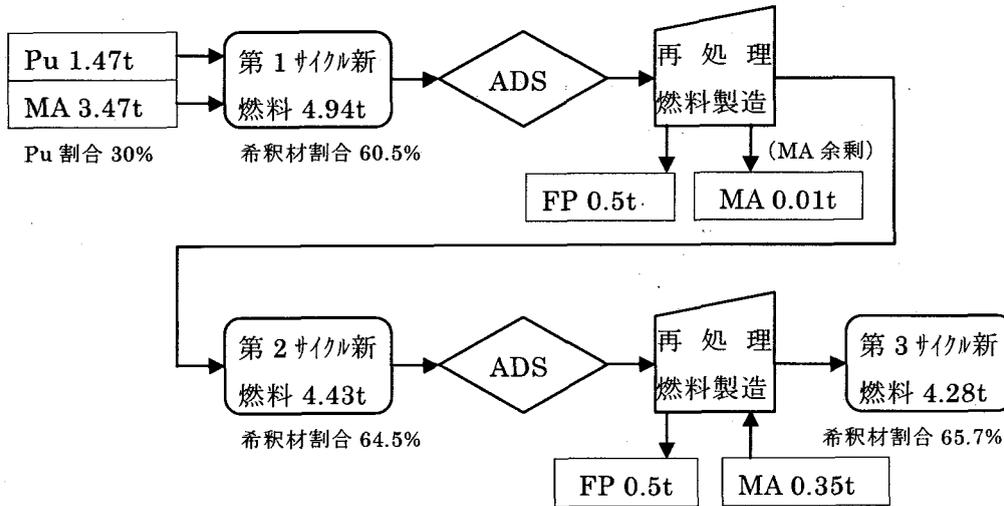


図 6 サイクル毎に希釈材含有量調整を行った場合の ADS 燃料サイクルマスフロー

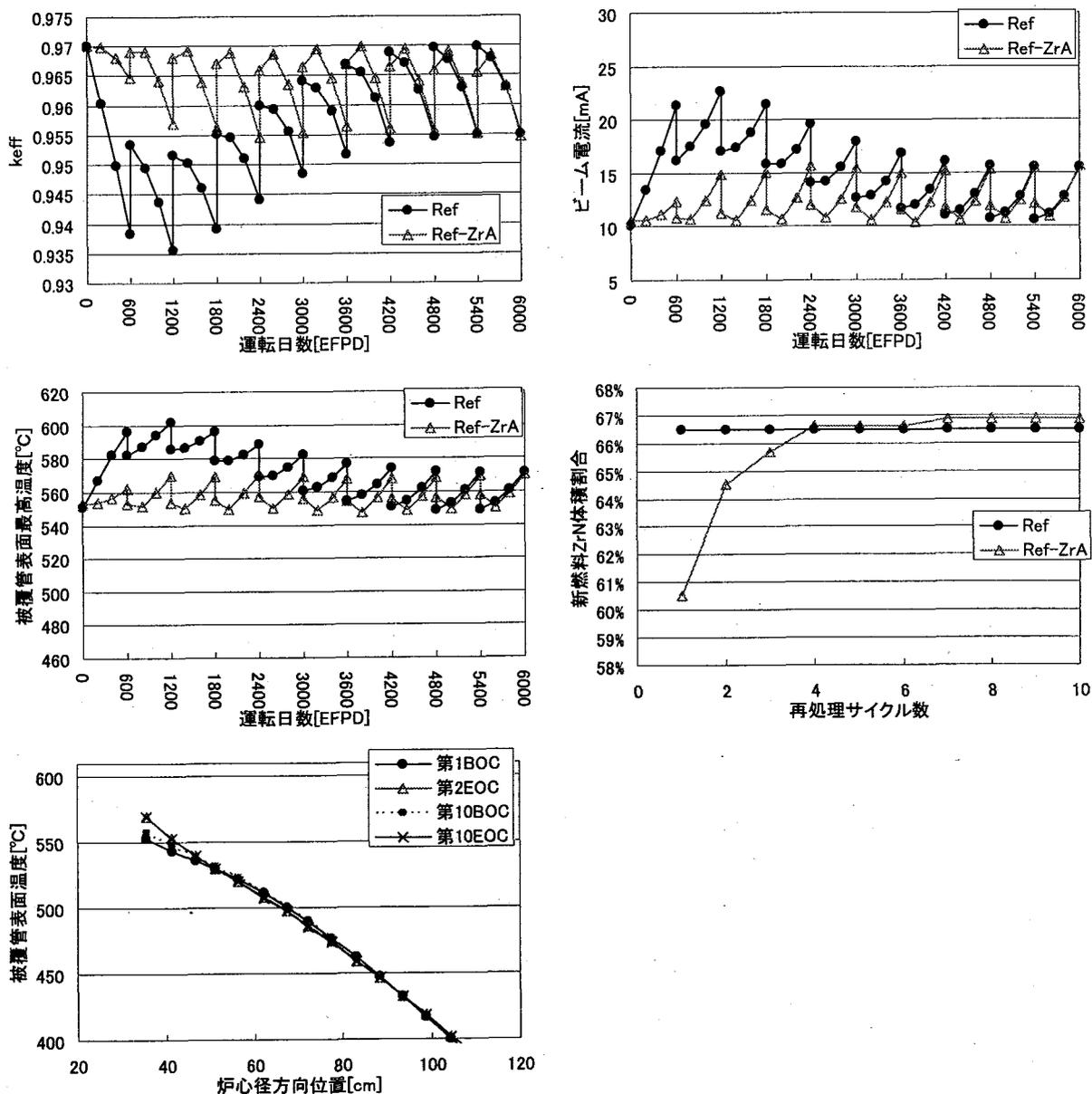


図 7 Ref-ZrA(参照+希釈材調整ケース)に対する計算結果 (左上: k_{eff} 、右上: ビーム電流、左中: 被覆管表面最高温度、右中: 希釈材体積割合、左下: 径方向温度分布)

3.3 炉心多領域化

以下に示す 3 つの方法で多領域化を行い、出力ピークを低減する。

- **Pu 富化度による多領域化:** 領域毎に異なる Pu 濃度を用いる。初期 Pu 濃度の影響はサイクルが進むにつれ緩和されるため、初期のサイクルにのみ有効な方法である。従って、この方法ではサイクル毎の希釈材割合調整を行わない。
- **ピン径による多領域化:** 燃料ピッチを変えずに、領域毎に異なる燃料ピン径を用いる。内側燃料ほど、細いピン径となる。この方法は BREST-300 の設計⁹⁾でも用いられており、ピーク部の出力密度が減少すると同時に流れる冷却材流量が多く

くなるので、大きな低減効果となることが期待される。しかし、ダクトレス集合体を採用する場合、圧力損失の不均衡に起因する領域間の冷却材横方向流れが生じることと、複数種類のペレット・被覆管・燃料集合体を製造する必要があることが短所である。

- ・ 希釈材割合による多領域化：領域毎に異なる希釈材割合を用いる。ピン径多領域化での短所の多くは改善されるが、サイクル毎の希釈材割合調整も適用する場合、希釈材割合が多岐にわたった燃料を製造する必要があることから、燃料管理が複雑になることが予想される。

集合体配置において燃料領域が4層に分かれていることから、図8に示すように各層に領域を割り当てて、2領域炉心、もしくは4領域炉心を構築する。この場合の解析モデルを図9に示す。また、燃焼計算では、領域間で燃料を混ぜない再処理方式とした。つまり、各領域が別個に再処理され、追加されるMAは取り除かれたFP量に応じて各領域に分配されるとした。

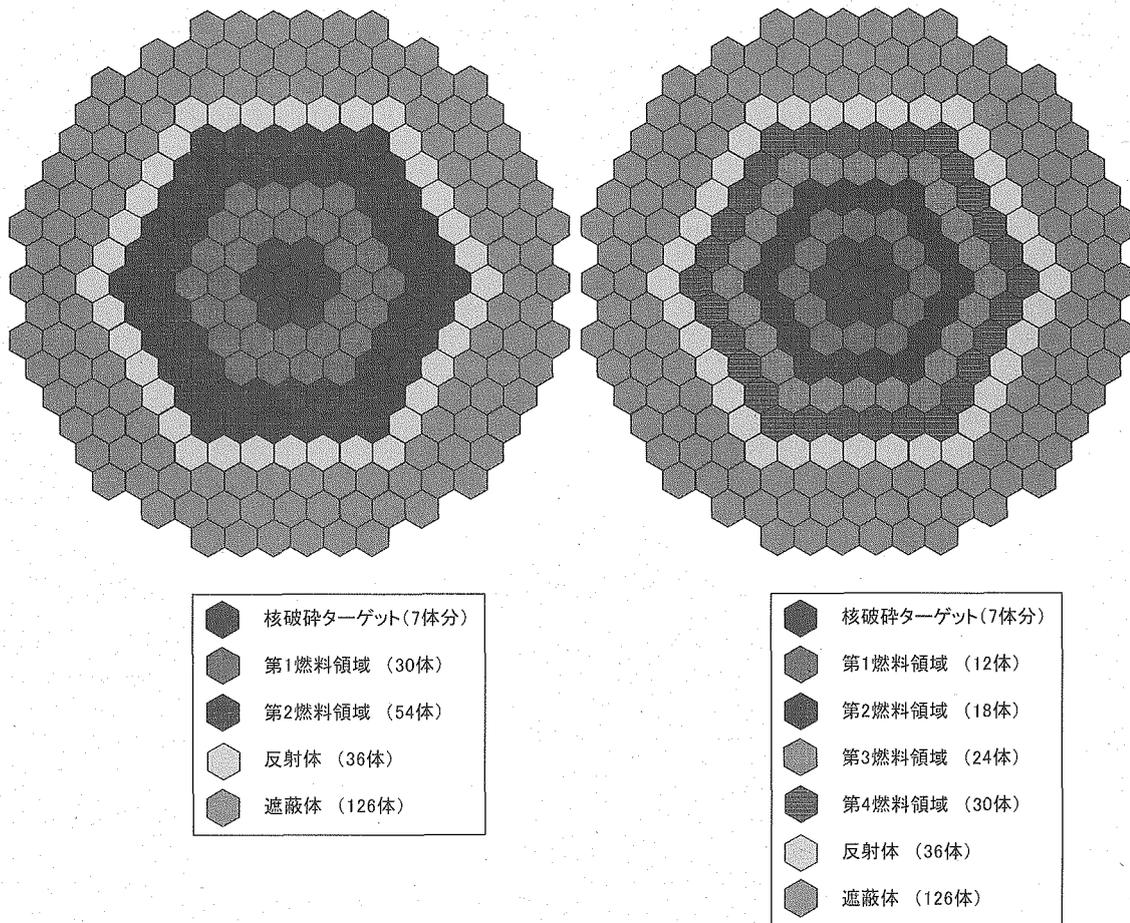


図8 多領域炉心配置図 (左：2領域、右：4領域)

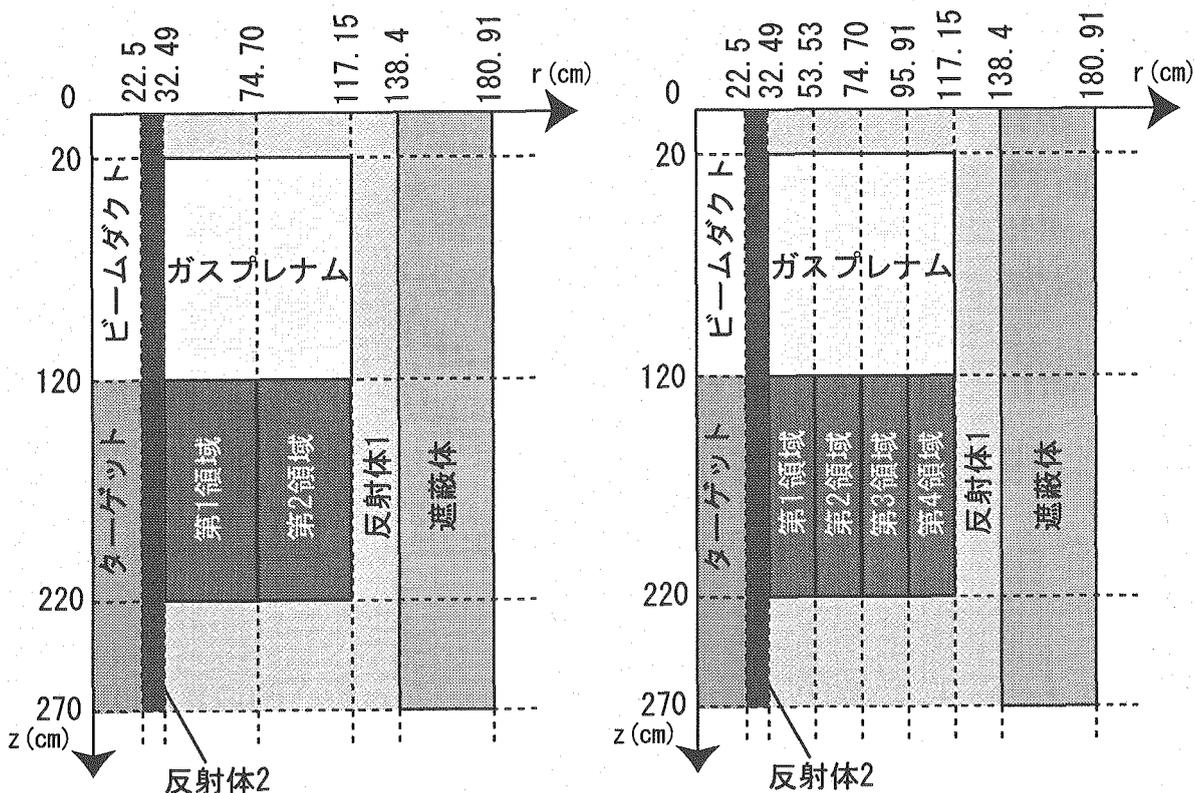


図 9 多領域炉心解析モデル (左: 2 領域、右: 4 領域)

3. 3. 1 Pu 富化度による多領域化

Pu 富化度を 2 領域化したケースを”Pu-2”と呼ぶ。表 6 に示すように、初期装荷 Pu 割合を参照炉心の 36.2% から領域毎に変化させる。第 1 領域の Pu 割合を文献 2 と同様に 30% とし、初期の k_{eff} が 0.97 となるように第 2 領域の Pu 割合を 42.4% とした。

解析の結果、図 10 に示すように、Ref ケースに比べ k_{eff} 変動幅が少し改善され、その効果でビーム電流および被覆管最高温度が改善されている。しかし、被覆管表面温度の分布を見ると、第 1 サイクル BOC (サイクル初期) では多領域化の効果が大きいですが、サイクルが進むにつれ効果が失われ、最も被覆管温度が高くなる第 2 サイクル EOC では、あまり多領域化の効果が残っていないことが分かる。つまり、Pu 富化度による多領域化によって、直接に出力ピークを低減する効果よりも、むしろ、 k_{eff} の燃焼による変動幅を低減することによる間接的な効果が大きいといえる。

表 6 Pu-2(Pu 富化度 2 領域ケース)の燃料パラメータ

	第 1 領域	第 2 領域
希釈材体積割合(vol%)	66.5%	←
初期装荷 Pu 割合 (vol%)	30.0%	42.4%
被覆管外径(cm)	0.765	←

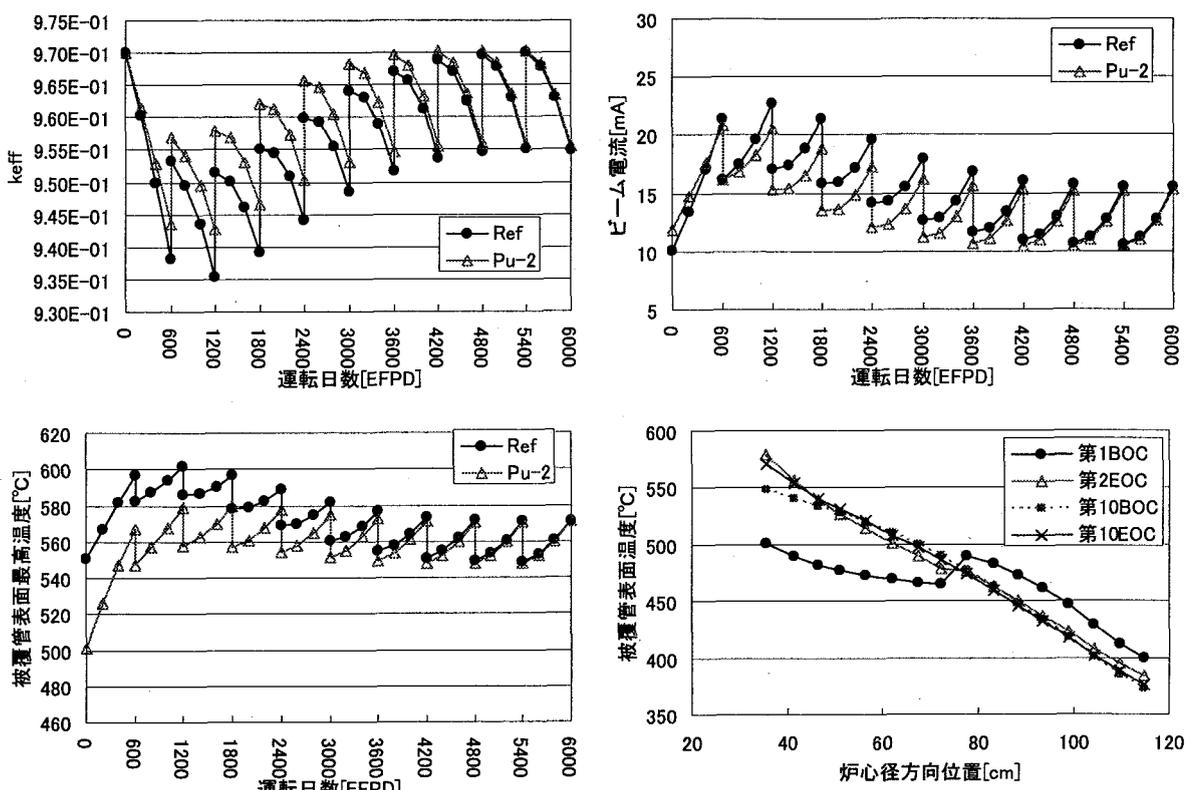


図 10 Pu-2(Pu 富化度 2 領域ケース)に対する計算結果
 (左上:keff、右上:ビーム電流、左下:被覆管表面最高温度、右下:径方向温度分布)

3.3.2 ピン径による多領域化

ピン径を 2 領域化したケースを”Pin-2”、 4 領域化したケースを”Pin-4”と呼ぶ。それぞれのケースに対して各領域のピン径を設定するために、 $keff=0.955$ の炉心を想定して、被覆管表面最高温度を最も低くすることを目的に、燃料の総体積を保存して領域毎のピン径を変更したパラメータサーベイを行った。 $keff=0.955$ はサイクル毎の希釈材割合調整を行った場合の最小の $keff$ であり、被覆管最高温度が最も高い炉心状態になっている。サイクル毎の希釈材割合調整を行わない場合、より小さい $keff$ となるため、より被覆管温度が高くなる。そのような炉心状態に対する最適なピン径と、 $keff=0.955$ の炉心に最適なピン径は異なるが、今回の検討ではサイクル毎の希釈材割合調整を前提とした最適化を行った。その結果、表 7 及び表 8 に示すような各領域のピン径を得た。ただし、最適化の際の被覆管表面温度の計算では、圧力損失の差による集合体間横方向流れが生じないものと仮定した。現実にはダクトレス集合体を想定しているため、内側領域と外側領域の圧力損失差により、外側から内側への冷却材流れが生じると考えられる。そのため、内側領域はより冷やされ、外側領域は熱くなる。今後、流動解析によりこの効果を見積もる必要があるが、この効果を考慮した場合、内側と外側のピン径の差は今回の最適値よりも縮まる方向であると考えられる。

サイクル毎に希釈材割合の調整を行わない場合の燃料パラメータを表 7 に示す。内側炉心のピン径を細くすると、炉心中心部の燃料が減少するため Ref ケースよりも keff が小さくなる。それを補うために、希釈材体積割合を 66.5% から 63.8% あるいは 64.5% に減少させた。

解析結果を図 11 に示す。keff 変動幅は Ref ケースと殆ど変わらない。しかし、ビーム電流は 20% 程度増加している。これは、炉心中央に燃料が少なくなるため、核破砕中性子の増倍率が減少するためである。これは多領域化全般における避けられない短所である。しかし、一方で、被覆管表面最高温度は 2 領域で 537°C、4 領域で 517°C にまで低減されており、大きな効果が得られている。径方向の分布から、第 2 サイクル EOC における中央のピークが低減しきれていないことも分かる。

ビーム電流の増加と、第 2 サイクル EOC における温度ピークを回避するには、サイクル毎の希釈材割合調整が有効である。サイクル毎の希釈材割合を表 8 に示すように調整し、ピン径を 2 領域化したケースを”Pin-2-ZrA”、4 領域化したケースを”Pin-4-ZrA”と呼ぶ。

図 12 に示すように、第 2 サイクル EOC のピークが解消し、低いビーム電流値と被覆管温度が達成できる。

表 7 Pin-2、Pin-4(ピン径による多領域ケース)の燃料パラメータ

2 領域炉心*1				
	第 1 領域		第 2 領域	
希釈材体積割合(vol%)	63.8%		←	
初期装荷 Pu 割合(vol%)	35.9%		←	
被覆管外径(cm)	0.635		0.804	
4 領域炉心*2				
	第 1 領域	第 2 領域	第 3 領域	第 4 領域
希釈材体積割合(vol%)	64.5%	←	←	←
初期装荷 Pu 割合(vol%)	35.9%	←	←	←
被覆管外径(cm)	0.6108	0.7045	0.7591	0.8502

*1 Pin-2 ケース *2 Pin-4 ケース

表 8 Pin-2-ZrA、Pin-4-ZrA(ピン径による多領域+希釈材調整ケース)の燃料パラメータ

2 領域炉心*1					
		第 1 領域	第 2 領域		
希釈材体積割合(vol%)	第 1 サイクル	59.0%	←		
	第 2 サイクル	61.2%	←		
	第 3 サイクル	62.8%	←		
	第 4 サイクル	63.6%	←		
	第 5 サイクル	63.6%	←		
	第 6 サイクル	63.7%	←		
	第 7~10 サイクル	63.8%	←		
初期装荷 Pu 割合 (vol%)		30.8%	←		
被覆管外径(cm)		0.635	0.804		
4 領域炉心*2					
		第 1 領域	第 2 領域	第 3 領域	第 4 領域
希釈材体積割合(vol%)	第 1 サイクル	59.0%	←	←	←
	第 2 サイクル	62.3%	←	←	←
	第 3 サイクル	63.8%	←	←	←
	第 4 サイクル	64.3%	←	←	←
	第 5 サイクル	64.5%	←	←	←
	第 6~10 サイクル	64.7%	←	←	←
		64.5%	←	←	←
初期装荷 Pu 割合 (vol%)		30.7%	←	←	←
被覆管外径(cm)		0.6108	0.7045	0.7591	0.8502

*1 Pin-2-ZrA ケース *2 Pin-4-ZrA ケース

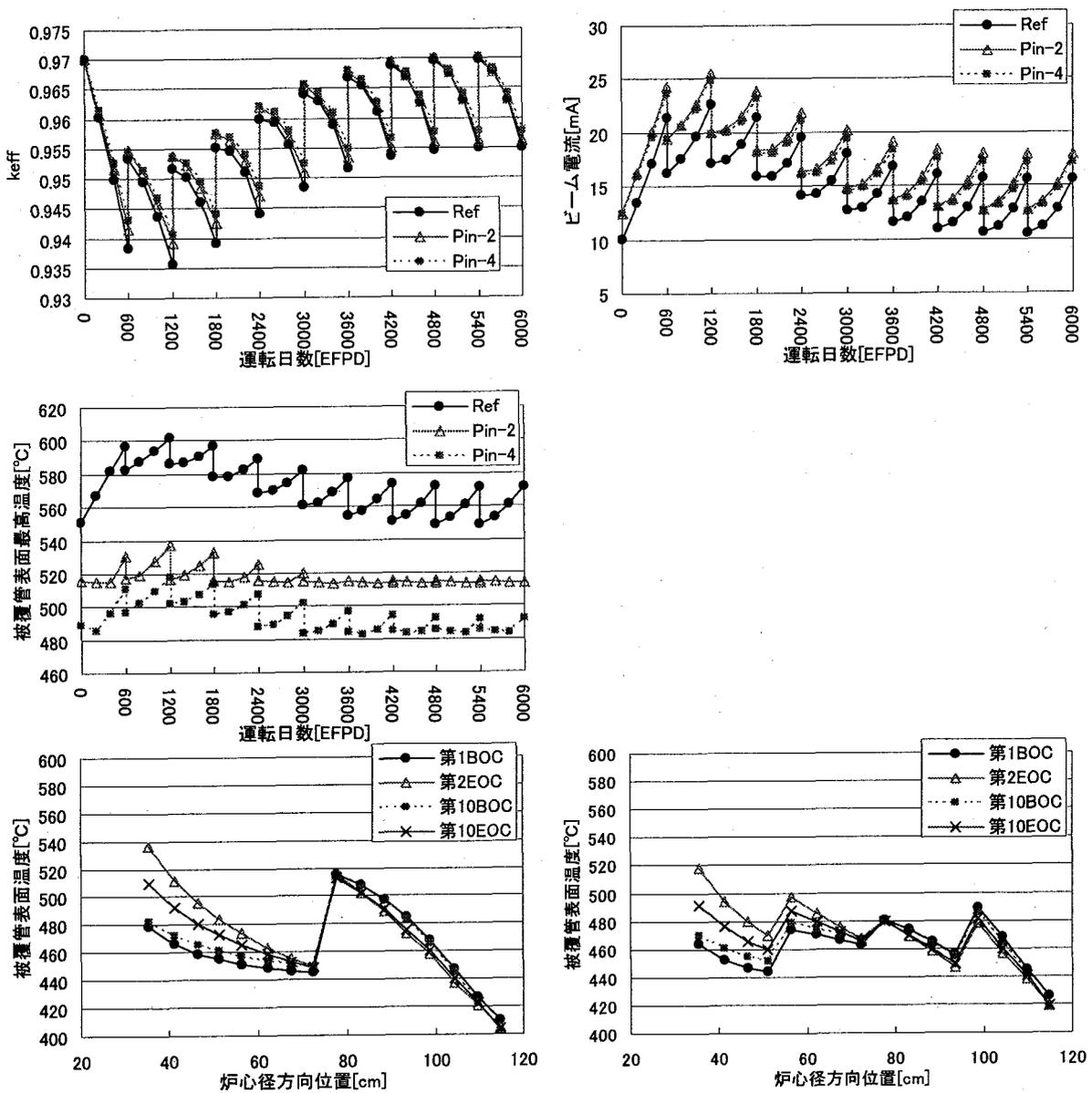


図 11 Pin-2、Pin-4(ピン径による多領域ケース)に対する計算結果 (左上: k_{eff} 、右上:ビーム電流、左中:被覆管表面最高温度、左下:Pin-2 径方向温度分布、右下:Pin-4 径方向温度分布)

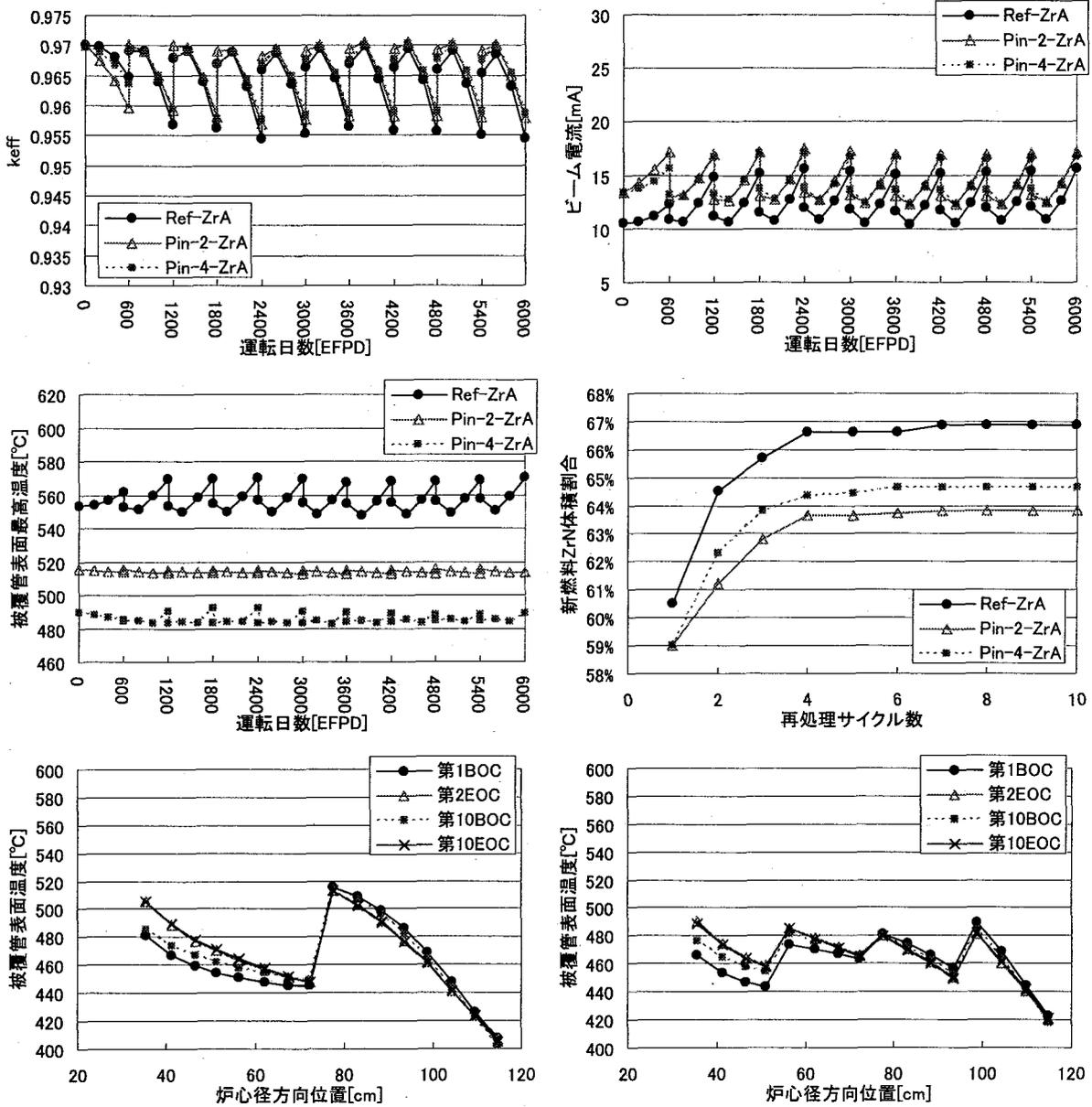


図 12 Pin-2-ZrA、Pin-4-ZrA (ピン径による多領域+希釈材調整ケース)に対する計算結果 (左上: k_{eff} 、右上:ビーム電流、左中:被覆管表面最高温度、右中:希釈材体積割合、左下: Pin-2-ZrA 径方向温度分布、右下: Pin-4-ZrA 径方向温度分布)

3.3.3 希釈材割合による多領域化

ZrN 希釈材割合を 2 領域化したケースを”Zr-2”、4 領域化したケースを”Zr-4”と呼ぶ。 $k_{eff}=0.955$ の炉心を想定して、被覆管表面最高温度を最も低くすることを目的に、領域毎の希釈材割合を変更したパラメータサーベイを行った。 $k_{eff}=0.955$ はサイクル毎の希釈材割合調整を行った場合の最小の k_{eff} であり、ピン径による多領域化と同じく、サイクル毎の希釈材割合調整を前提とした最適化になっている。その結果、表 9 及び表 10 に示す炉心平均に対する各領域の希釈材割合の比を得た。炉心中心部の燃料が減少するため Ref ケースに比べて k_{eff} が小さくなるので、それを補うために、炉心全体の平均希釈材体積割合は 66.5% から 65.0% あるいは 64.3% に減少している。

サイクル毎の希釈材割合調整を行わなかった場合の燃料パラメータを表 9 に示す。解析の結果、図 13 に示すように、 k_{eff} 変動幅は Ref ケースよりもやや小さい。しかし、中性子源の増倍率が低下するため、ビーム電流は増加している。一方、被覆管表面温度は 2 領域で 533℃、4 領域で 506℃ にまで低減されており、ピン径による多領域化と同様の大きな効果が得られている。また、径方向の分布から、第 2 サイクル EOC における中央のピークが低減しきれていない。

ビーム電流の増加と、第 2 サイクル EOC における温度ピークを回避するには、サイクル毎の希釈材割合調整が有効である。サイクル毎に希釈材割合を調整し、希釈材割合を 2 領域化したケースを”Zr-2-ZrA”、4 領域化したケースを”Zr-4-ZrA”と呼ぶ。表 10 に示すように、各サイクルにおいて各領域の希釈材割合の炉心平均に対する比を保存して、各サイクルにおいて k_{eff} の最大値が 0.97 になるような希釈材体積割合を得た。

解析の結果、図 14 に示すように、第 2 サイクル EOC のピークを解消でき、低いビーム電流値と被覆管温度を達成できる。

表 9 Zr-2、Zr-4(希釈材割合による多領域化ケース)の燃料パラメータ

2 領域炉心*1					
	第 1 領域	第 2 領域	炉心平均		
希釈材体積割合(平均に対する比)	1.150	0.917	1.000		
希釈材体積割合(vol%)	74.8%	59.6%	65.0%		
初期装荷 Pu 割合(vol%)	36.0%	←	←		
被覆管外径(cm)	0.765	←	←		
4 領域炉心*2					
	第 1	第 2	第 3	第 4	炉心平均
希釈材体積割合(平均に対する比)	1.205	1.088	1.005	0.861	1.000
希釈材体積割合(vol%)	77.4%	69.9%	64.6%	55.3%	64.3%
初期装荷 Pu 割合(vol%)	34.4%	←	←	←	←
被覆管外径(cm)	0.765	←	←	←	←

*1 Zr-2 ケース *2 Zr-4 ケース

表 10 Zr-2-ZrA、Zr-4-ZrA (希釈材割合による多領域化+希釈材調整ケース)の燃料パラメータ

2 領域炉心*1						
		第 1 領域	第 2 領域	炉心平均		
希釈材体積割合(平均に対する比)		1.150	0.917	1.000		
希釈材体積割合(vol%)	第 1 サイクル	67.5%	53.8%	58.7%		
	第 2 サイクル	72.2%	57.6%	62.8%		
	第 3~5 サイクル	74.5%	59.4%	64.8%		
	第 6~10 サイクル	74.9%	59.7%	65.2%		
初期装荷 Pu 割合 (vol%)		29.3%	←	←		
被覆管外径(cm)		0.765	←	←		
4 領域炉心*2						
		第 1	第 2	第 3	第 4	炉心平均
希釈材体積割合(平均に対する比)		1.205	1.088	1.005	0.861	1.000
希釈材体積割合(vol%)	第 1 サイクル	71.1%	64.2%	59.3%	50.8%	59.0%
	第 2 サイクル	75.7%	68.3%	63.1%	54.1%	62.8%
	第 3 サイクル	75.8%	68.5%	63.2%	54.2%	62.9%
	第 4~10 サイクル	77.8%	70.2%	64.9%	55.6%	64.6%
初期装荷 Pu 割合 (vol%)		30.1%	←	←	←	←
被覆管外径(cm)		0.765	←	←	←	←

*1 Zr-2-ZrA ケース *2 Zr-4-ZrA ケース

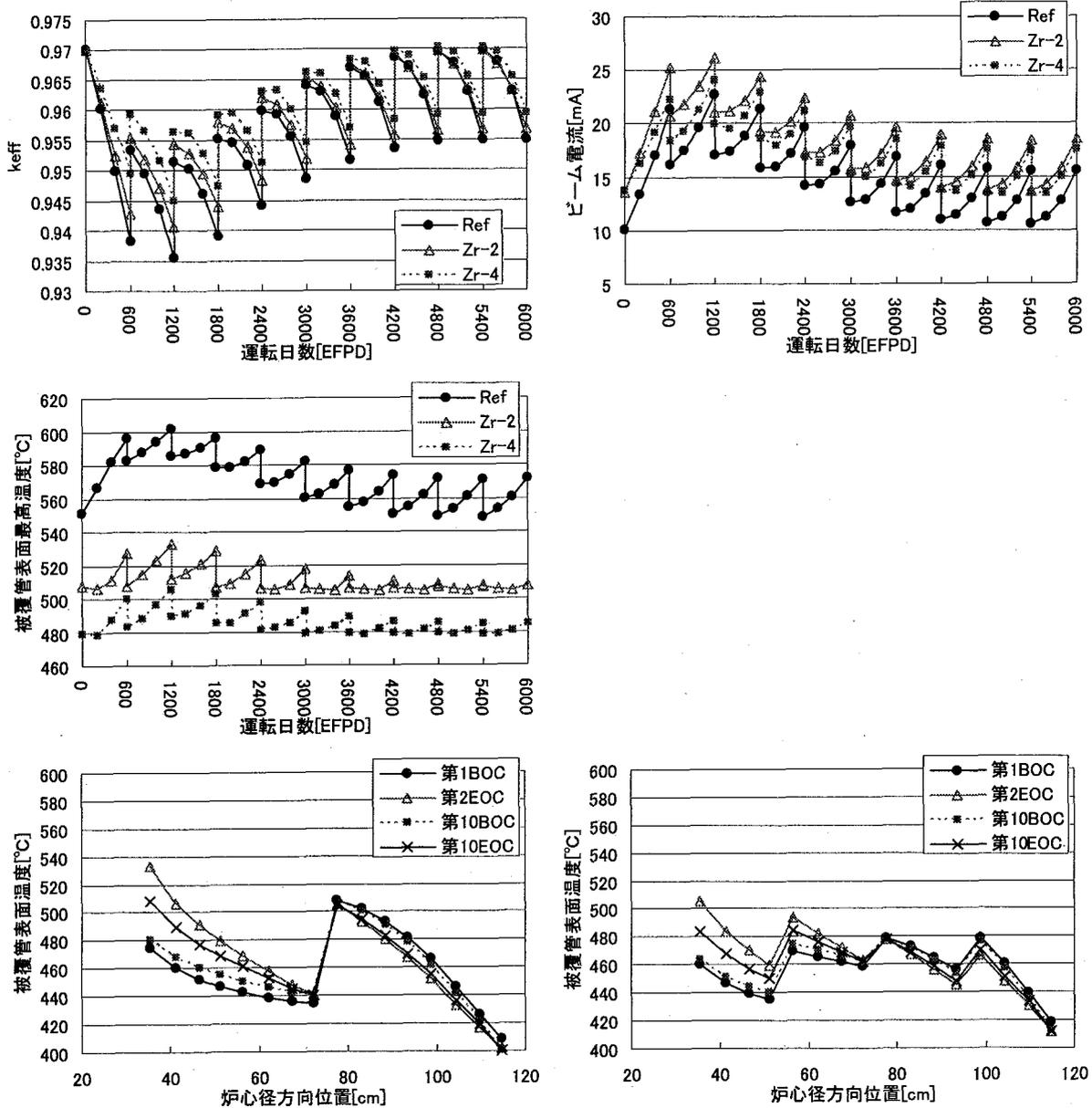


図 13 Zr-2、Zr-4(希釈材割合による多領域化ケース)に対する計算結果 (左上:keff、右上:ビーム電流、左中:被覆管表面最高温度、左下:Zr-2 径方向温度分布、右下:Zr-4 径方向温度分布)

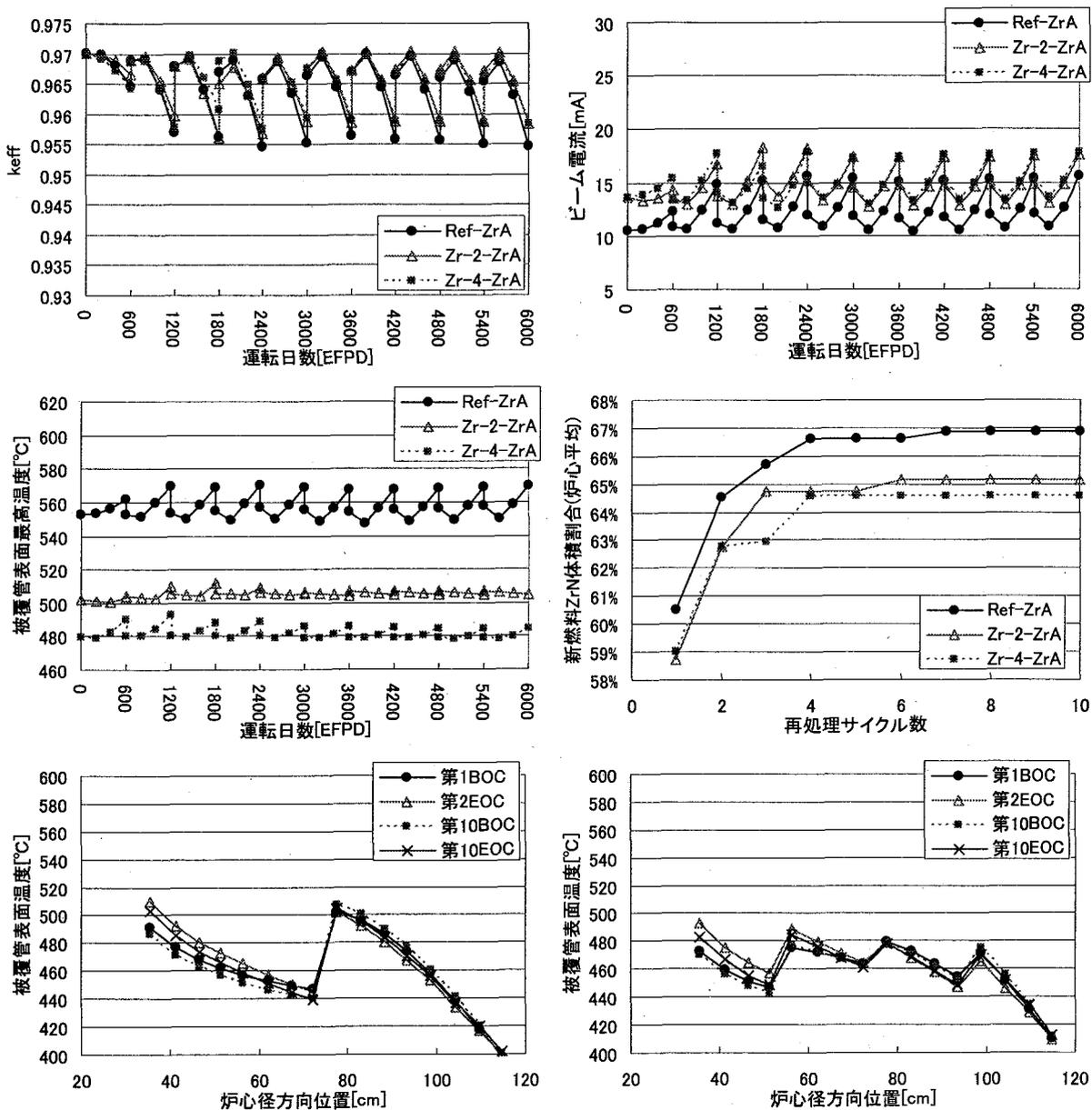


図 14 Zr-2-ZrA、Zr-4-ZrA (希釈材割合による多領域化+希釈材調整ケース) に対する計算結果 (左上: keff、右上: ビーム電流、左中: 被覆管表面最高温度、右中: 希釈材体積割合、左下: Zr-2-ZrA 径方向温度分布、右下: Zr-4-ZrA 径方向温度分布)

3.4 ビーム入射位置変更

参照炉心では、ビーム入射位置は炉心発熱部上端(z=120cm)に位置している。ターゲット近傍の集合体では、集合体上端部に被覆管温度のピークが現れる。これは、ターゲット近傍において炉心上部に偏った発熱分布になっているためである。この偏りを解消するために、ビーム入射位置を下げ、より炉心中心部に近づける方法を検討する。

図 15に示すように、ビーム窓の位置を 120~170cm の範囲で変化させパラメータサーベイを行う。その結果、図 16に示すように、第 1 サイクル BOC 及び、サイクル毎の希釈材割合調整を行わない場合に最も問題になる第 2 サイクル EOC において、ビーム入射位置を炉心発熱部上面から下げる程、被覆管最高温度を低減できることがわかるが、図 17に示すようにビーム窓位置を下げる効果は飽和する傾向にある。また、ビーム窓位置が下がりすぎると、核破碎中性子の増倍率が下がるため、図 18に示すように、より大きいビーム強度が必要となる。ビーム電流が過度に大きくならない範囲で、被覆管温度の低減を優先し、上面から 40cm 下方のビーム位置を選択した。

ビーム入射位置を下げる方法の欠点は、ビーム窓にかかる LBE 圧力がそれだけ増大することと、図 19に示すように、より炉心中心に近づくことから、多くの中性子照射に耐える必要があることである。ビーム窓を 40cm 下げた場合、炉心からの中性子照射量が 16%増加する。

ビーム窓を 40cm 下げた炉心を"Win"、更にサイクル毎の希釈材調整をした炉心を"Win-ZrA"と呼ぶ。表 11および表 12に Win ケースおよび Win-ZrA ケースの燃料パラメータをそれぞれ示す。これらは、Ref ケースおよび Ref-ZrA ケースと殆ど同じであるが、ターゲット領域がビームダクトに置換された為に keff が小さくなるので、補うために希釈材体積割合が僅かに小さくなっている。Win ケースに対する結果(図 20)から、keff の推移は殆ど変わらないが、ビーム電流値が少し低減されている。これは、ビーム入射位置を炉心中心部にした結果、核破碎中性子の増倍率が増加したからである。また、被覆管最高温度は 569℃に減少している。Win-ZrA ケースに対する結果(図 21)でも、同様の効果が得られており、被覆管最高温度は 546℃に低減されている。

表 11 Win (ビーム入射位置変更ケース)の燃料パラメータ

希釈材体積割合(vol%)	66.4%
初期装荷 Pu 割合(vol%)	36.2%
被覆管外径(cm)	0.765

表 12 Win-ZrA(ビーム入射位置変更+希釈材調整ケース)の燃料パラメータ

希釈材体積割合(vol%)	第 1 サイクル	60.0%
	第 2 サイクル	64.1%
	第 3 サイクル	66.0%
	第 4 サイクル	66.0%
	第 5～第 10 サイクル	66.7%
初期装荷 Pu 割合 (vol%)		29.3%
被覆管外径(cm)		0.765

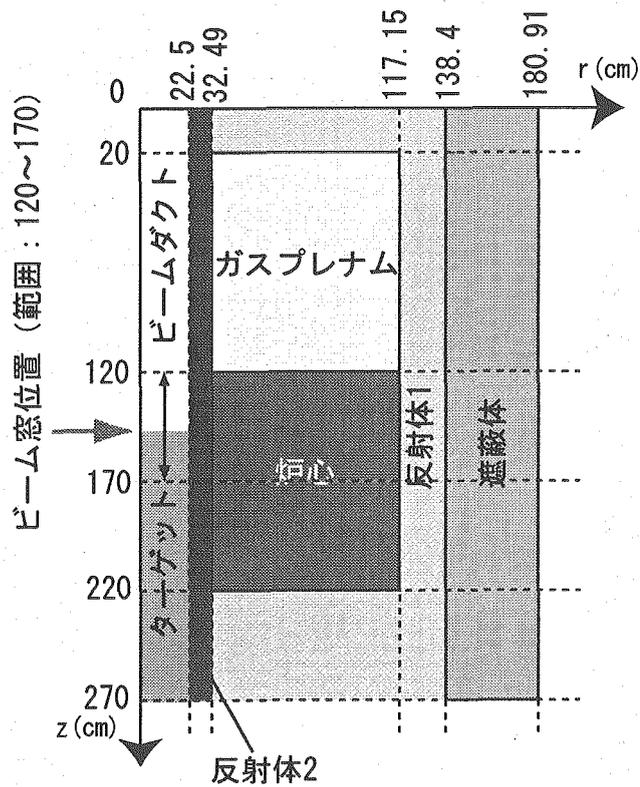


図 15 ビーム入射位置変更炉心解析モデル

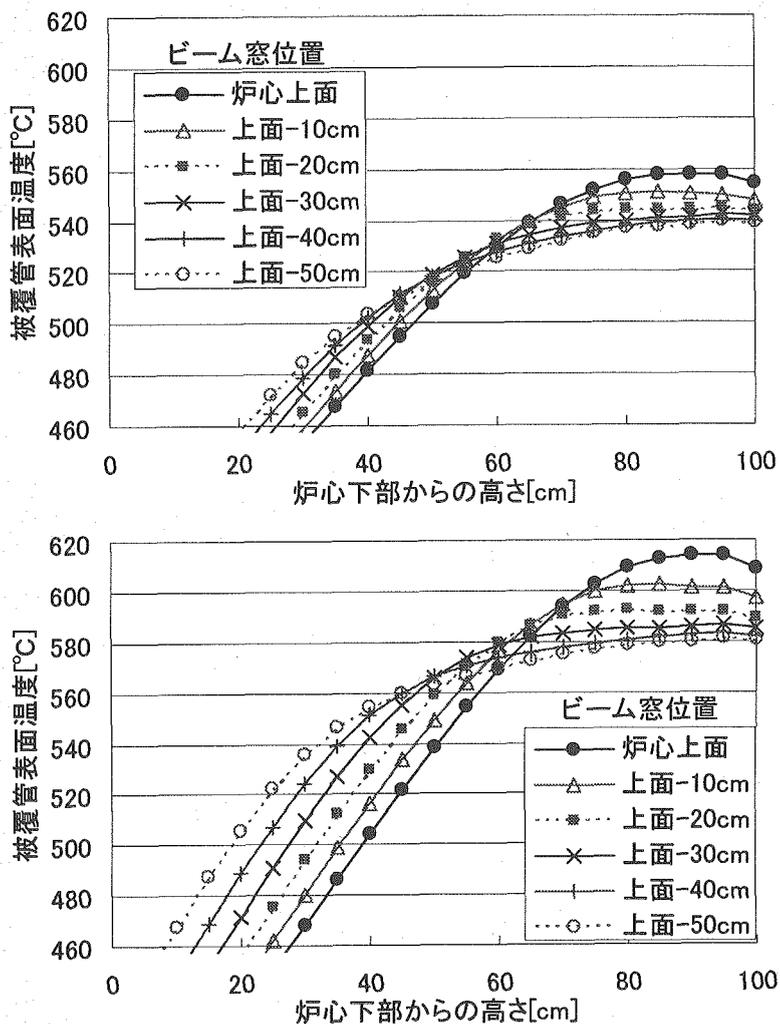


図 16 ビーム入射位置と ターゲット近傍集合体の被覆管温度上昇 (上：第 1 サイクル BOC、下：第 2 サイクル EOC)

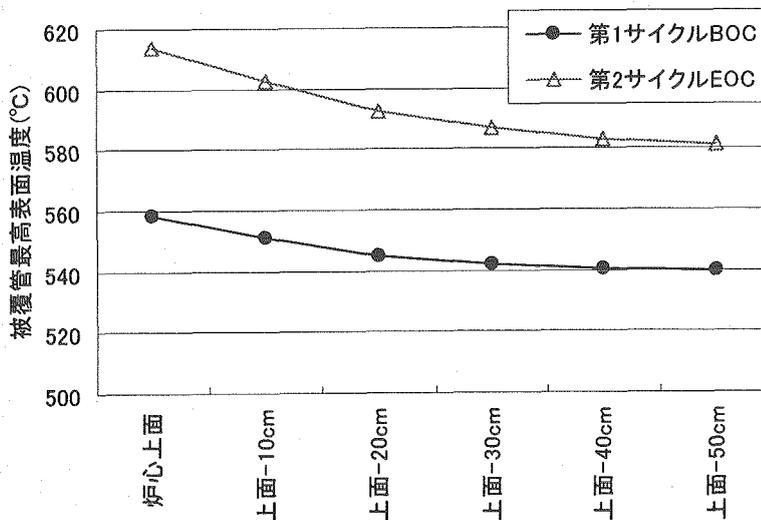


図 17 ビーム入射位置と被覆管最高表面温度

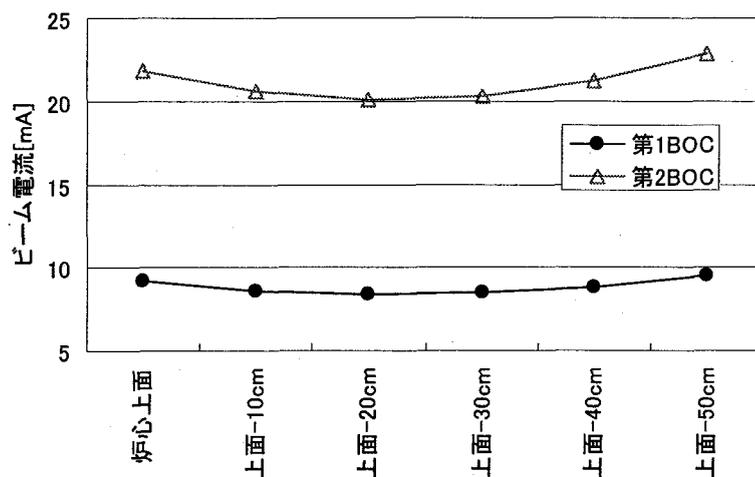


図 18 ビーム入射位置とビーム電流

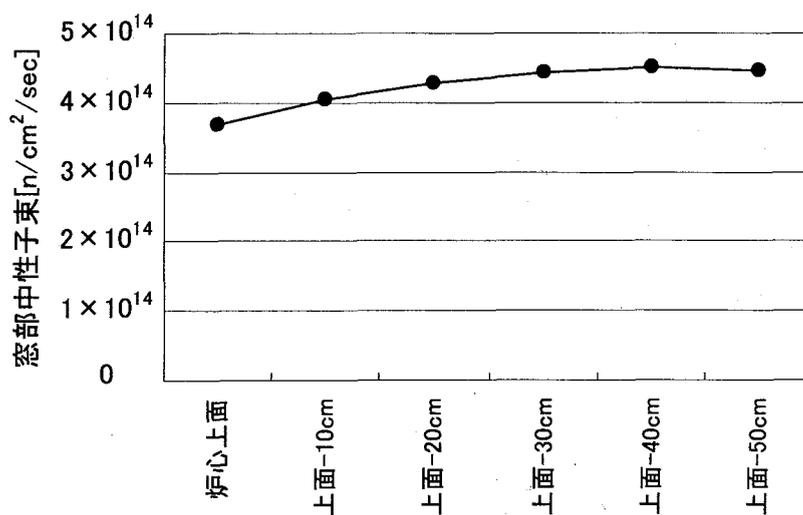


図 19 ビーム入射位置と窓部中性子束 (第1サイクルBOC)

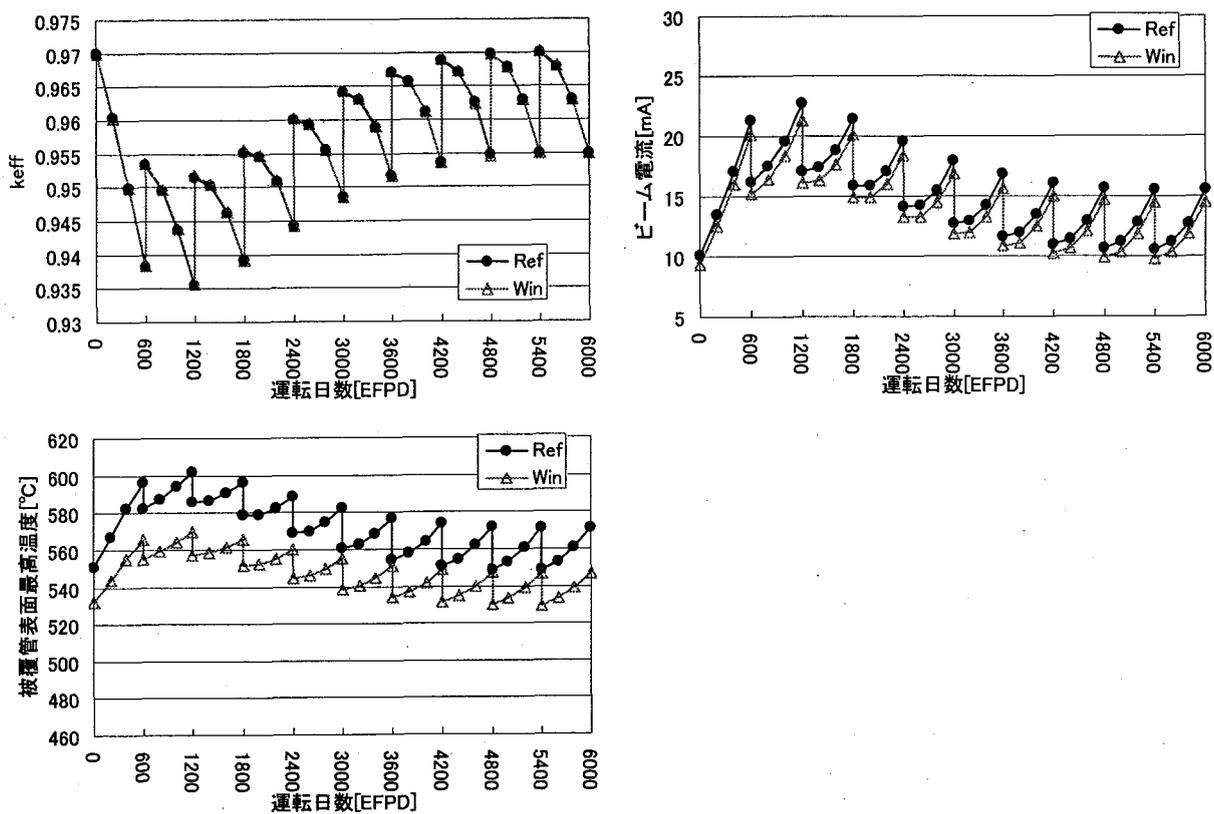


図 20 Win (ビーム入射位置変更ケース) に対する計算結果 (左上: keff、右上: ビーム電流、左下: 被覆管表面最高温度)

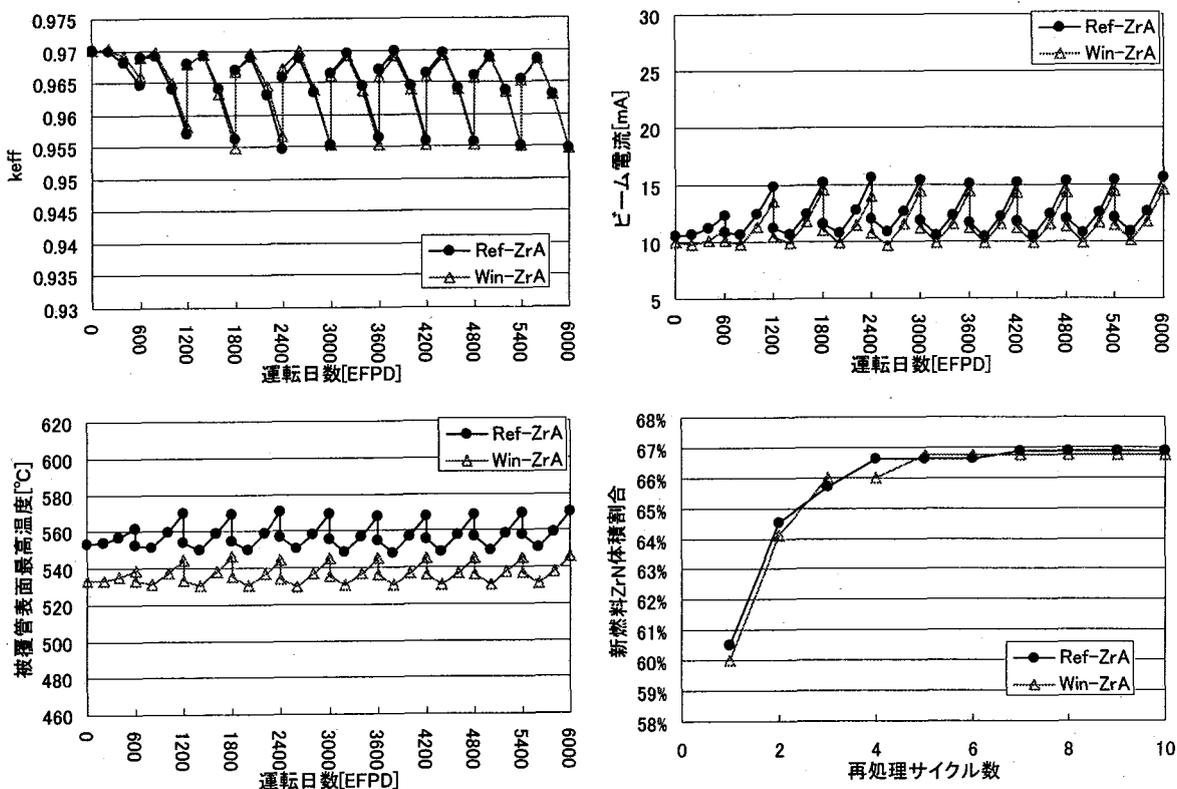


図 21 Win-ZrA (ビーム入射位置変更+希釈材割合調整ケース) に対する計算結果 (左上: keff、右上: ビーム電流、左下: 被覆管表面最高温度、右下: 希釈材体積割合)

3.5 中央燃料集合体の短尺化

Ref ケースでは出力ピークは最も内側に近い集合体（中央燃料集合体）で発生する。そこで、中央燃料集合体のみを短尺化し、被覆管最高温度の低減を図る。図 22 に示すように、上部からの短尺化（パターン A）と下部からの短尺化（パターン B）を想定する。短尺化は最大 50cm 行い、 $k_{eff}=0.97$ と $k_{eff}=0.955$ に設定した炉心に対するパラメータサーベイによって短尺化長さを決定する。

$k_{eff}=0.97$ はサイクル毎の希釈材調整を行ったケースの BOC を、 $k_{eff}=0.955$ はサイクル毎の希釈材調整を行ったケースの EOC を想定したものである。図 5 右下図等に示すように、同じ k_{eff} を持つ第 1 サイクル BOC と第 10 サイクル BOC は MA 組成が異なるにも関わらず、被覆管表面温度分布はほとんど同じである。このように、 k_{eff} が同じであれば、出力分布は組成に大きく影響されないため、サイクル計算を行うことなくパラメータサーベイを行うことが可能である。希釈材調整を行わないケースでは $k_{eff}=0.955$ 以下になるサイクルが現れるが、そのサイクルに対する最適化は行わないものとした。

パラメータサーベイの結果、図 23 に示すような径方向温度分布が得られた。図 24 に示した各ケースの最高表面温度から、パターン A よりもパターン B の方が優れていることが分かる。また、短尺化を行うと、ターゲット近傍の燃料が減少するため、核破碎中性子の増倍率が減少し、図 25 に示すように短尺化無しの炉心に比べて、より多くの陽子ビーム電流を必要とする。特にパターン A では、非常に多くのビーム電流を必要とすることから、ここでもパターン B が優れており、パターン B を選択した。

図 24 から、より被覆管温度が高くなる $k_{eff}=0.955$ の炉心状態におけるパターン B の被覆管最高温度に対する効果は短尺化長さが 40cm を超えると飽和する傾向にあり、一方、図 25 から必要な陽子ビーム電流の増加が大きくなるため、パターン B による 40cm の短尺化を選択した。この場合、必要なビーム電流は短尺化なしの炉心に比べて 5%程度増加している。

各サイクルの希釈材割合調整を行わない場合を"Ass"、サイクル毎の希釈材調整を行った場合を"Ass-ZrA"と呼び、表 13、及び表 14 にそれぞれの燃料パラメータを示す。これらは、Ref ケース及び Ref-ZrA ケースに比べて、中央燃料の一部が失われているため、同じ希釈材割合では k_{eff} が小さくなってしまふ。これを補うために希釈材体積割合が小さくなっている。

Ass ケースに対する結果（図 26）から、 k_{eff} の推移は殆ど変わらないが、ビーム電流値が 5%程度増加している。また、被覆管最高温度は 552℃に減少している。Ass-ZrA ケースに対する結果（図 27）でも、同様の効果が得られており、被覆管最高温度は 525℃に低減されている。

表 13 Ass(中央燃料集合体短尺化ケース)の燃料パラメータ

希釈材体積割合(vol%)	65.0%
初期装荷Pu割合(vol%)	35.9%
被覆管外径(cm)	0.765

表 14 Ass-ZrA (中央燃料集合体短尺化+希釈材割合調整ケース)の燃料パラメータ

希釈材体積割合(vol%)	第1サイクル	59.0%
	第2サイクル	62.9%
	第3サイクル	63.5%
	第4サイクル	64.6%
	第5サイクル	64.6%
	第6サイクル	64.7%
	第7~第10サイクル	64.8%
初期装荷Pu割合(vol%)		29.3%
被覆管外径(cm)		0.765

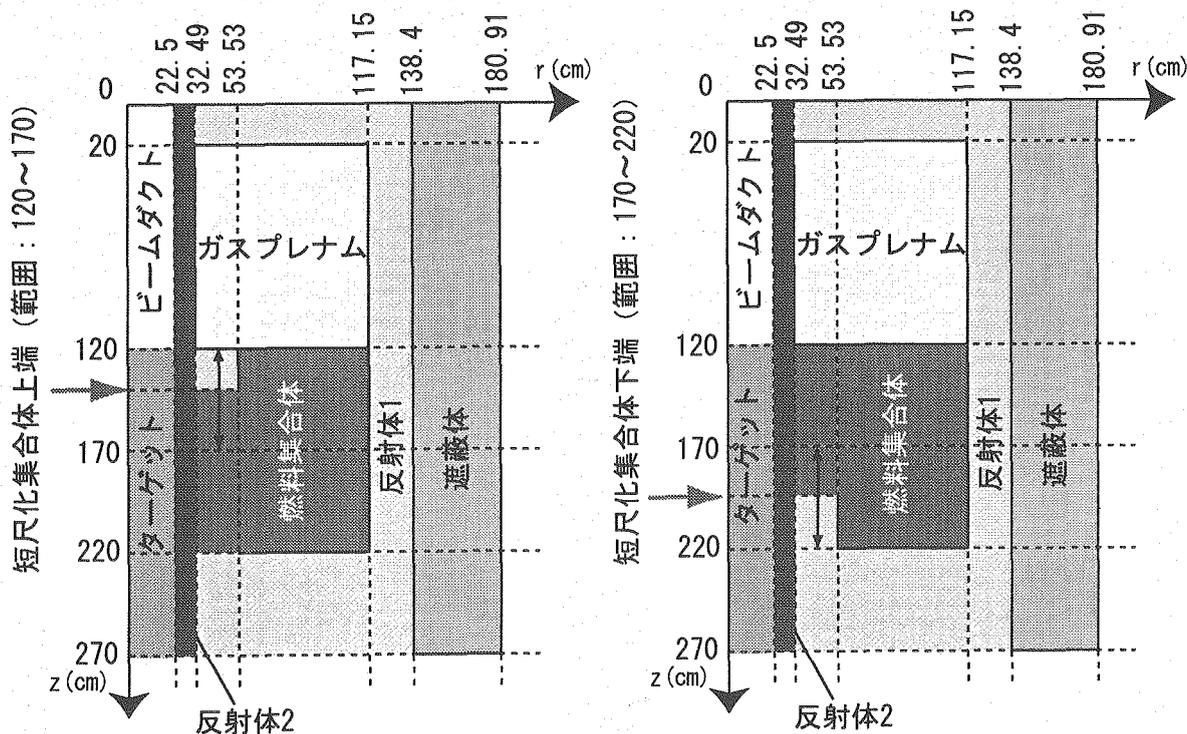


図 22 中央燃料集合体短尺化炉心解析モデル (左: パターン A、右: パターン B)

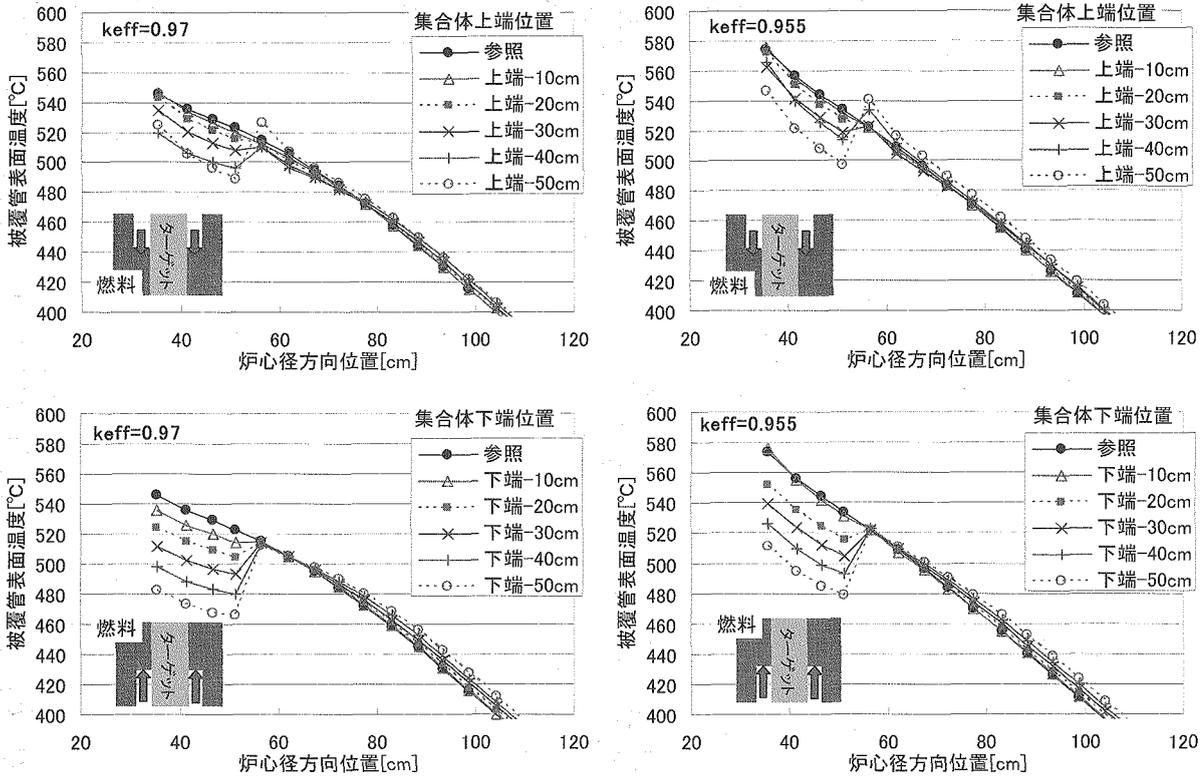


図 23 中央燃料集合体短尺化パラメータサーベイ (左上：パターン A, keff=0.97、右上：パターン A, keff=0.955、左下：パターン B, keff=0.97、右下：パターン B, keff=0.955)

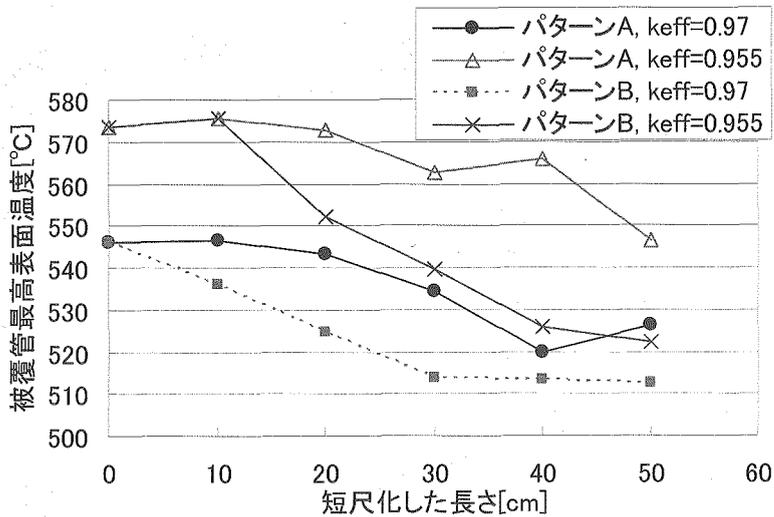


図 24 中央燃料集合体短尺化パラメータサーベイ：被覆管最高表面温度

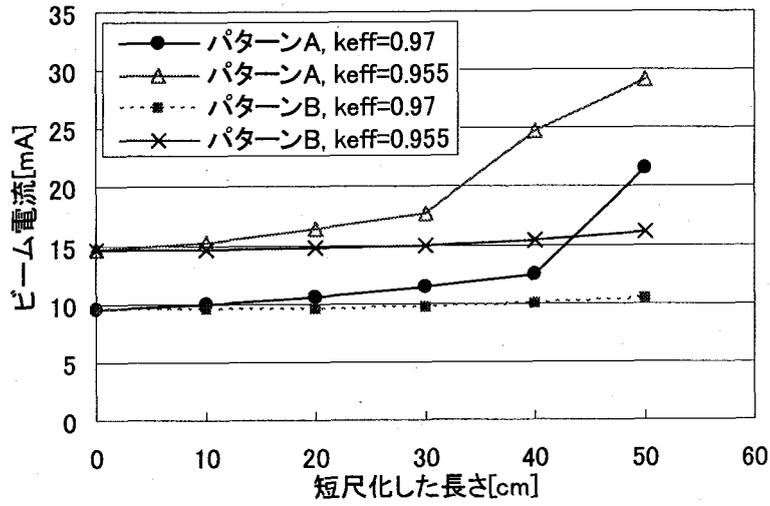


図 25 中央燃料集合体短尺化パラメータサーベイ：陽子ビーム電流

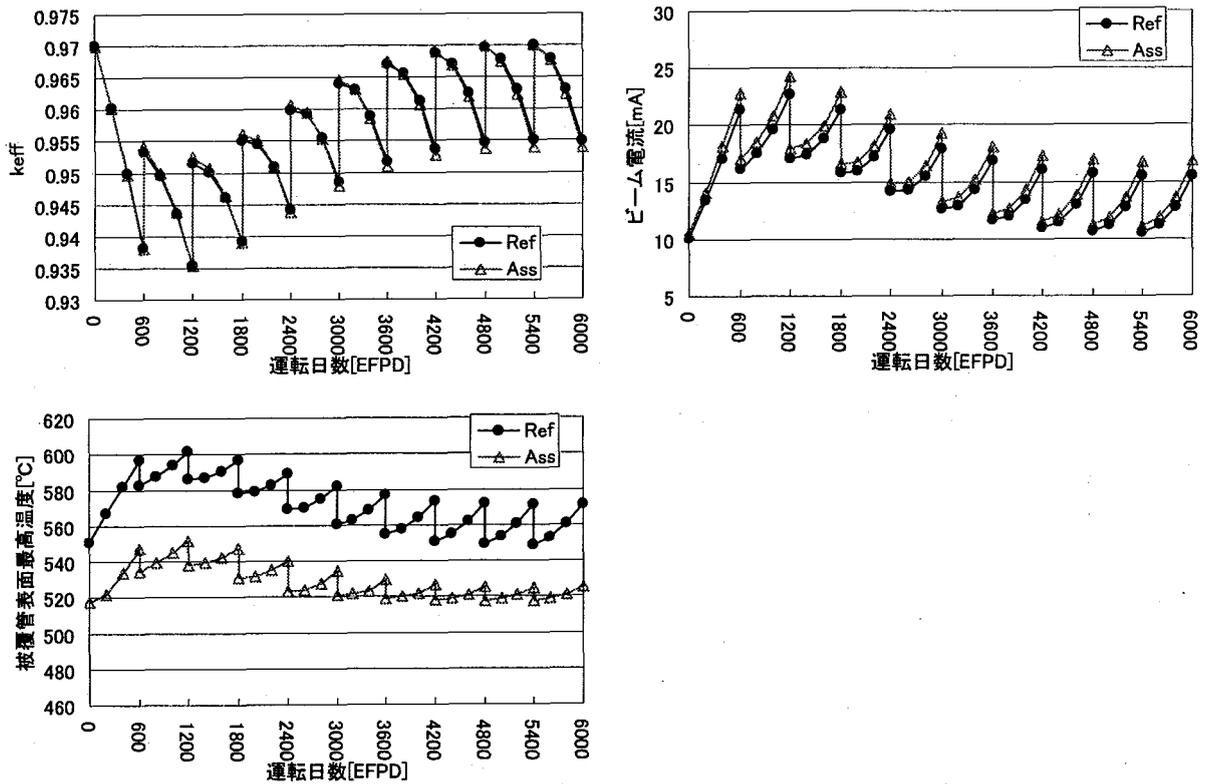


図 26 Ass(中央燃料集合体短尺化ケース)に対する計算結果 (左上:keff、右上:ビーム電流、左下:被覆管表面最高温度)

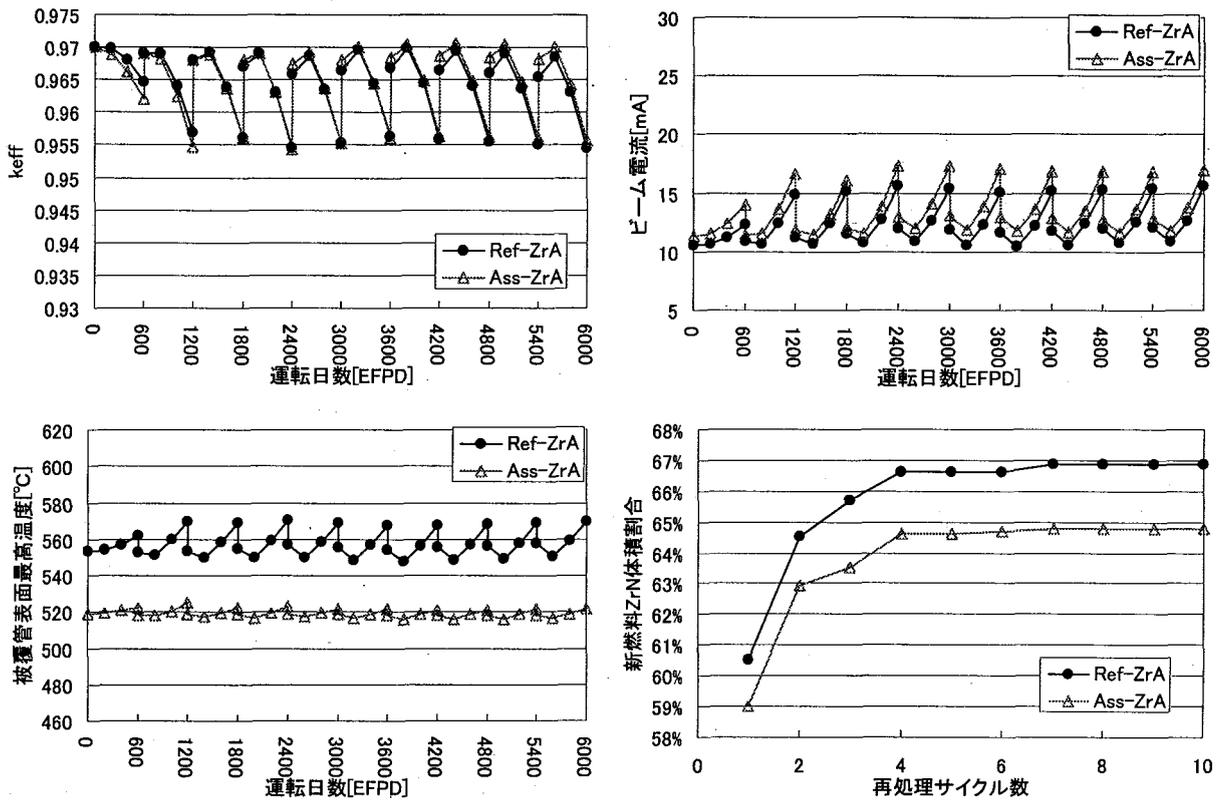


図 27 Ass-ZrA (中央燃料集合体短尺化+希釈材割合調整ケース) に対する計算結果 (左上: k_{eff} 、右上: ビーム電流、左下: 被覆管表面最高温度、右下: 希釈材体積割合)

3.6 全体検討

本章では多様な出力分布平坦化方策を検討してきたが、本節ではこれらを横断的に比較して、それぞれの特徴を議論する。表 15に結果の一覧を示す。

本研究で検討した平坦化手法は、多領域化とそれ以外の方法（ビーム入射位置調整と中央燃料短尺化）に分けられ、多領域化とそれ以外の方法を同時に行うことは効果が薄い。これは、後者の方法では、中央近傍の燃料集合体の被覆管温度を低減することのみには効果があるが、一方、前者の多領域化では、中央近傍だけでなく、第 2 領域、あるいは、第 3、第 4 領域にも出力ピークが存在するため、中央領域のみの低減では効果が薄いからである。そのため、ここでは多領域化とそれ以外の方法の組み合わせを考慮しない。一方、ビーム入射位置調整と中央燃料短尺化は同時に行うことが考えられる。しかし、ここでは個々の評価にとどめる。

まず、表 15の上段に示すサイクル毎の希釈材割合調整を行わない場合全般と、下段に示すサイクル毎の希釈材割合調整を行う場合全般を比較する。各ケースにおいて、サイクル毎の希釈材割合調整を行うことで、最高ビーム電流は 26~30%、平均ビーム電流は 14~20%、被覆管温度は 13~31°C、低減することができる。特にビーム電流の低減効果が著しい。欠点として、希釈材割合を新燃料毎に変更するため、燃料サイクル側の負担は大きくなることが挙げられるが、割合を変更する範囲は、希釈材割合の多領域化を行わない場合、59~67%程度である。商業炉から供給される MA の組成が商業炉の種類や運転履歴によって一定ではないことも考慮すると、希釈材割合によって炉心全体の反応度のある程度調整して ADS を運転することは、可能性の高い選択肢である。

次に、多領域化手法間の比較を行う。Pu 富化度とその他の 2 手法を比較すると、ビーム電流では Pu 富化度の方が有利であるが、温度の低減はその他の 2 手法が大きく優れており、ビーム電流と被覆管温度のトレードオフになっている。ピン径と希釈材の多領域化を比較すると、ピン径多領域化の方が若干ビーム電流が小さい傾向にあるが、被覆管温度の低減効果は殆ど同等であり、Ref ケースと Pin-4-ZrA ケースや Zr-4-ZrA ケースを比較すると、約 110°C の温度低減がなされている。図 28に示すように、ピン径と希釈材割合について多領域化した場合の燃料体積割合は同じ傾向を持つ。つまり、2 つの多領域化手法の差は、燃料物質を冷却材に置換するか希釈材に置換するかの差であると言える。一見、冷却材に置換した方が、冷却材流量が増えて冷却材温度が低くなるため有利であるように見える。しかし、線出力は 2 手法間で殆ど同じであるので、ピン径調整手法での被覆管表面における熱流束は希釈材調整手法に比べて大きくなる。その結果、被覆管表面と冷却材の温度差が大きくなり、冷却材温度が下がった効果を打ち消してしまうため、結果的にピン径と希釈材の多領域化手法はどちらも同程度の温度低減効果を与えている。集合体製造工程への負担を考えると、ピン径による多領域化では、領域間で同じ組成で違う大きさのペレット・被覆管を製造するのに対し、希釈材多領域化では、領域間で異なる組成で同じ大きさのペレット・被覆管を製造するという差がある。また、ピン径による多領域化では領域間のクロスフローが発生するなど、炉心形状が複雑化す

る。一方、希釈材多領域化では、更にサイクル毎の希釈材調整を行う場合、燃料管理が複雑化する可能性がある。

ビーム入射位置調整と中央燃料集合体短尺化を比較すると、ビーム入射位置調整の方が、ビーム電流が小さくて済むが、温度低減効果は小さい。また、ビーム窓の炉心から中性子による照射損傷が増加してしまう等の欠点がある。一方、中央燃料短尺化では2種類の集合体を製造する必要がある。

最後に、多領域化手法、ビーム入射位置調整及び中央燃料短尺化を比較する。図 29 および図 30に概観するように、被覆管温度の低減とビーム電流の低減は相反する傾向にある。すなわち、より大きな被覆管温度低減を行うと、より大きなビーム電流が必要となる。これは、参照炉心では中央にあった出力ピークを低減させることは、中央にある燃料の量を少なくすることを意味し、その結果、核破砕中性子の増倍率が減少するからである。ビーム入射位置調整手法は、ビーム電流を低減し、被覆管温度を 20~30℃ではあるが低下させるものの、中性子照射量や外圧上昇など ADS の設計上最も厳しい部位の一つであるビーム窓の条件を悪化させる。以上のように、これらの手法のいずれを選択するかは、ビーム電流条件、被覆管温度条件、ビーム窓条件等を考慮し、更に燃料サイクル上の適合性（再処理、燃料製造に要するコスト等）を勘案して総合的に判断すべき問題であることがわかる。

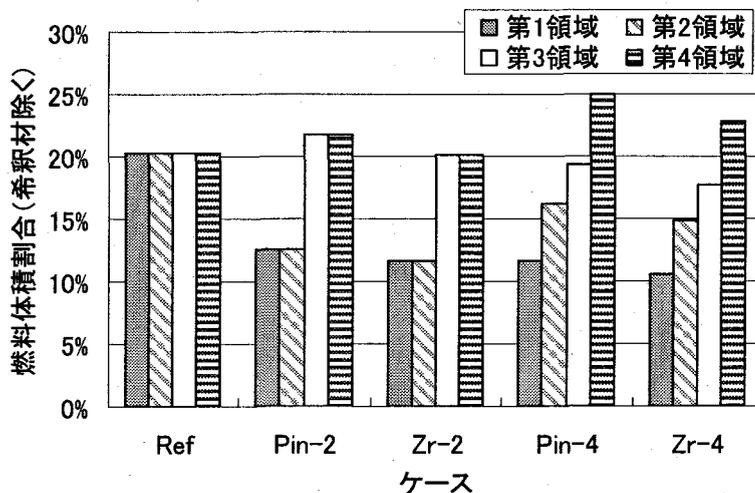


図 28 ピン径と希釈材割合による多領域化手法の燃料体積割合の比較

表 15 出力分布平坦化手法結果一覧

ID	参照	多領域								中央燃料 短尺化	
		ピン径				希釈材					
		Pu-2	Pu-4	Zr-2	Zr-4	Win	Ass				
keff	Ref	0.935	0.940	0.941	0.945	0.936	0.935				
	最小	0.943	0.939	0.941	0.945	0.936	0.935				
ビーム電流[mA]	最大	20.8	25.5	26.2	24.1	21.3	24.2				
	(Refからの変化率)	(-8%)	(12%)	(15%)	(6%)	(-6%)	(7%)				
	平均	14.0	17.4	18.2	17.0	13.9	15.8				
	(Refからの変化率)	(-7%)	(14%)	(22%)	(14%)	(-7%)	(6%)				
被覆管表面最高 温度[°C]	最大	580	537	533	506	569	552				
	(Refからの変化)	(-22)	(-65)	(-69)	(-96)	(-32)	(-50)				
希釈材調整無し											
希釈材調整あり											
keff	Ref-ZrA	0.955	0.958	0.956	0.958	0.955	0.954				
	最小	0.955	0.957	0.956	0.958	0.955	0.954				
ビーム電流[mA]	最大	15.7	17.5	18.2	17.1	14.5	17.3				
	(Ref-ZrAからの変化率)		(12%)	(17%)	(9%)	(-7%)	(11%)				
	平均	12.1	14.1	14.5	14.0	11.2	13.2				
	(Ref-ZrAからの変化率)		(17%)	(20%)	(16%)	(-7%)	(9%)				
被覆管表面最高 温度[°C]	最大	570	515	511	492	546	525				
	(Ref-ZrAからの変化)		(-55)	(-59)	(-78)	(-24)	(-45)				
短所											
第1サイクルのみ2種類の組成を用意。		2種類のペレット・被覆管・集合体を用意。領域境界のクロスコロー。		2種類のペレット・被覆管・集合体を用意。領域境界のクロスコロー。		4種類のペレット・被覆管・集合体を用意。領域境界のクロスコロー。		2種類の組成を用意。希釈材調整ありの場合、燃料管理が複雑化。		4種類の組成を用意。希釈材調整ありの場合、燃料管理が複雑化。	
						ビーム窓の中性子照射量が16%増加。外圧増加。				2種類の集合体用意	

Ref	参照炉心
Pu-2	Pu 富化度 2 領域
Pin-2	ピン径 2 領域
Pin-4	ピン径 4 領域
Zr-2	希釈材 2 領域
Zr-4	希釈材 4 領域
Win	ビーム入射位置 -40cm
Ass	中央燃料集合体 40cm 短尺化
Ref-ZrA	参照炉心+サイクル 毎の希釈材調整
Pin-2-ZrA	ピン径 2 領域+サイク ル毎の希釈材調整
Pin-4-ZrA	ピン径 4 領域+サイク ル毎の希釈材調整
Zr-2-ZrA	希釈材 2 領域+サイ クル毎の希釈材調整
Zr-4-ZrA	希釈材 4 領域+サイ クル毎の希釈材調整
Win-ZrA	ビーム入射位置+サ イクル毎の希釈材調 整
Ass-ZrA	中央燃料集合体+サ イクル毎の希釈材調 整

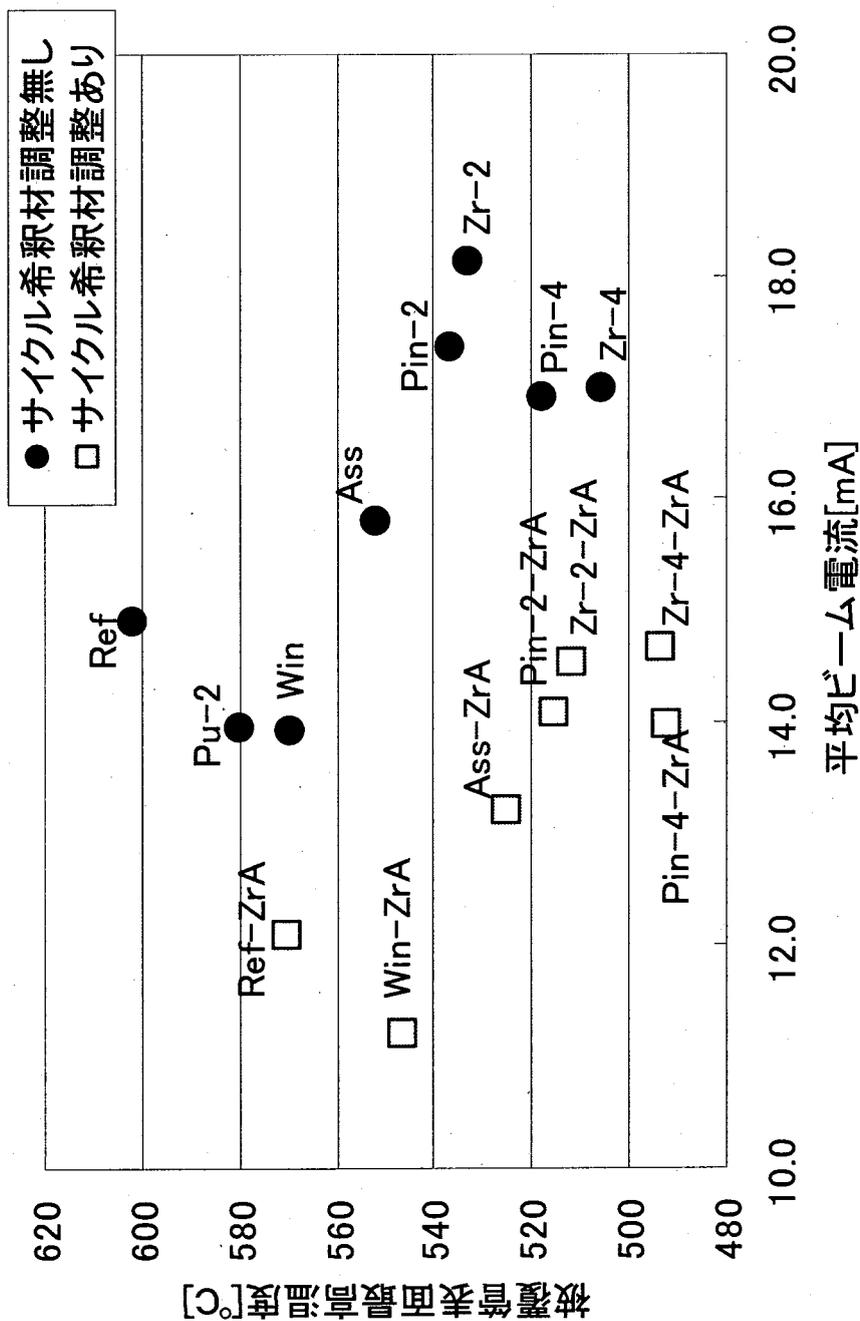


図 29 出力分布平坦化手法結果一覧 (1)

Ref	参照炉心
Pu-2	Pu 富化度 2 領域
Pin-2	ピン径 2 領域
Pin-4	ピン径 4 領域
Zr-2	希釈材 2 領域
Zr-4	希釈材 4 領域
Win	ビーム入射位置 -40cm
Ass	中央燃料集合体 40cm 短尺化
Ref-ZrA	参照炉心+サイクル 毎の希釈材調整
Pin-2-ZrA	ピン径 2 領域+サイク ル毎の希釈材調整
Pin-4-ZrA	ピン径 4 領域+サイク ル毎の希釈材調整
Zr-2-ZrA	希釈材 2 領域+サイ クル毎の希釈材調整
Zr-4-ZrA	希釈材 4 領域+サイ クル毎の希釈材調整
Win-ZrA	ビーム入射位置+サ イクル毎の希釈材調 整
Ass-ZrA	中央燃料集合体+サ イクル毎の希釈材調 整

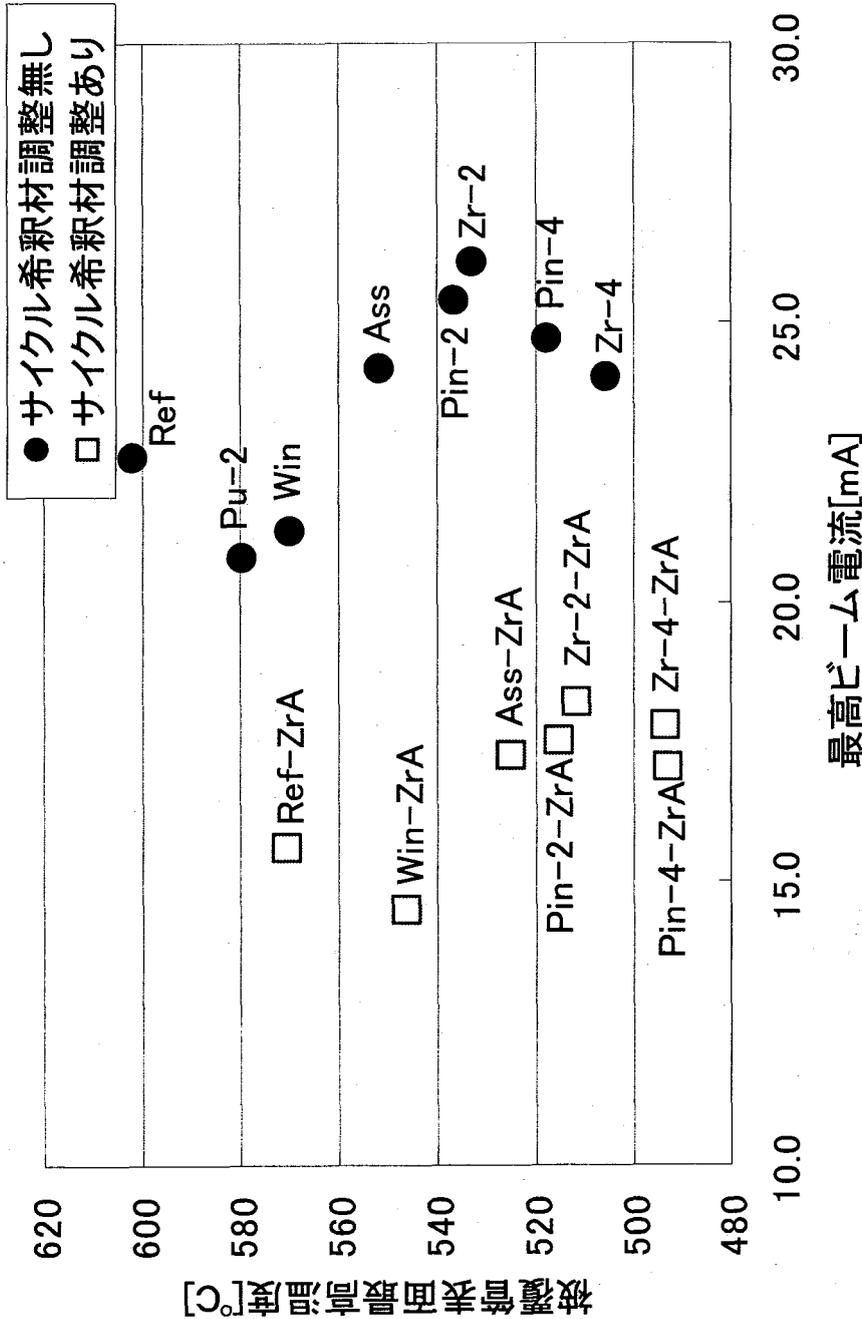


図 30 出力分布平坦化手法結果一覧 (2)

4 結言

JAEA が概念設計を進めている ADS に対して被覆管表面温度を低減することを目的に、さまざまな手法を考案して従来炉心の改良検討を行った。被覆管表面温度は出力ピークに大きく依存しており、出力ピークは必要となるビーム電流強度に関係している。ビーム出力の増加は陽子加速器仕様やビーム窓設計に影響を及ぼすため、ビーム電流に対する影響も併せて考慮した。

本研究では、出力ピークを低減するために、まず希釈材割合をサイクル毎に調整することによる未臨界度の燃焼変化の抑制効果を検討した。この方法により、被覆管温度だけでなく、ビーム電流を大きく低減出来ることがわかった。希釈材割合のサイクル毎の調整は、後述するその他の手法にも組み合わせることが可能であり、被覆管温度とビーム電流の低減に効果的である。

次に、炉心を 2 領域化または 4 領域化し、Pu 富化度、ピン径、あるいは、希釈材割合を領域毎に調整することにより、中心部分の出力ピークを低減する効果を検討した。Pu 富化度調整では、被覆管温度低減効果は大きくないものの、 k_{eff} の燃焼による変動を低減させる効果により、ビーム電流と被覆管温度を共に改善した。ピン径及び希釈材割合の多領域化では、ビーム電流値が 10~20%程度大きくなるものの、最大 110℃の非常に大きな被覆管温度低減を実現できることが分かった。

また、ビーム入射高さを炉心発熱部上端から 40cm 下げることにより、中央燃料集合体の軸方向出力ピーク位置を変化させた結果、被覆管温度を 30℃程度低減すると共に、ビーム電流を 7%程度低減した。炉心中央に近い燃料集合体を下部から 40cm 短尺化することで、ビーム電流は 7~10%程度増加したものの、被覆管温度を 50℃程度低減した。

以上のように本研究では多様な方法による被覆管温度の低減効果を検討し、最大 110℃の温度低減を達成したが、被覆管温度の大きな低減はビーム電流の低減と相反する性質があるなど、全ての手法はそれぞれの改善効果と短所を持つ。そのため、これらの手法のいずれを選択するかは、被覆管温度条件のみならず、ビーム電流条件、ビーム窓条件、そして、燃料サイクルとの適合性を考慮して総合的に判断することになる。

今後の検討課題としては、新燃料に混入する FP 核種の影響評価、冷却材の集合体間横流れを評価するための熱流動計算、工学的安全係数を考慮した被覆管表面最高温度の評価などが挙げられる。

謝辞

本研究を行うにあたり有用な助言を頂いた東京工業大学の関本博教授に感謝の意を表します。

参考文献

1. 大井川宏之, 他: “原研における長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方”, JAERI-Review 2005-043, 日本原子力研究所 (2005).
2. K. Tsujimoto, et al.: ” Neutronics Design for Lead-Bismuth Cooled Accelerator-Driven System for Transmutation of Minor Actinide,” Journal of Nucl. Sci. Technol., 41, 21(2004)
3. M. Nakagawa and K. Tsuchihashi: “SLAROM: A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor”, JAERI 1294, Japan Atomic Energy Research Institute (1984).
4. A. E. Alcouffe, F. W. Brinkley, D. R. Marr and R. D. O'Dell: “User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional, Diffusion-Accelerated, Neutral-Particle, Transport”, LA-10049-M, Los Alamos National Laboratory (1990).
5. A. G. Croff: “ORIGEN2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials”, Nucl. Technol., 62, 335 (1983).
6. K. Shibata, et al.: “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3”, J. Nucl. Sci. Technol., 39, 1125(2002).
7. H. Takano and Y. Ishiguro: “Production and Benchmark Tests of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2”, JAERI-M 82-135, Japan Atomic Energy Research Institute (1982).
8. H. Takada, N. Yoshizawa, K. Kosako and K. Ishibashi: “An Upgraded Version of the Nucleon Meson Transport Code: NMTC/JAERI97”, JAERI-Data/Code 98-005, Japan Atomic Energy Research Institute (1998).
9. 池上哲雄, 他: “鉛冷却炉の炉心・燃料設計検討—平成 11 年度報告—”, JNC TN9400 2000-070, 核燃料サイクル開発機構 (2000).

付録 A 計算モデル

A.1 ジオメトリ

表 A-1 及び図 A-1 に今回用いた計算モデルを示す。

表 A-1 TWODANT 計算メッシュ

径方向メッシュ 位置[cm]	メッシュ 数	軸方向メッシュ 位置[cm]	メッシュ 数
0	5	0	5
22.5	2	20	10
32.4915	2	120	12
44.2784	2	180	8
53.53	2	220	5
64.9829	2	270	
74.7001	2		
85.9644	2		
95.9148	2		
107.06	2		
117.1497	5		
138.4	8		
180.91			

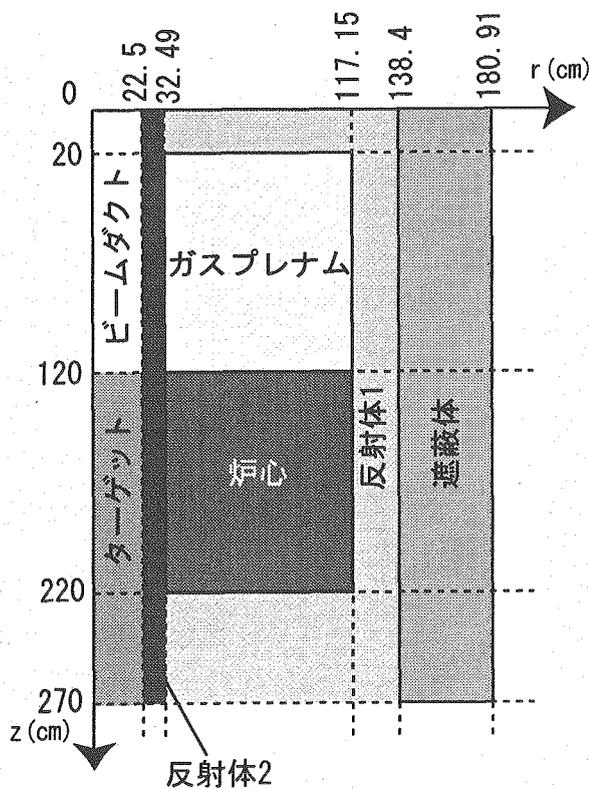


図 A-1 4領域 TWODANT 計算モデル

A.2 組成

表 A-2 に燃焼度 45GWd/HMt の PWR 使用済み燃料を 5 年冷却後に再処理した後、更に 3 年間貯蔵した時点の MA と Pu 組成を示す。MA に若干量の Pu-240 が、Pu に Am-241 が入るのは 3 年間の貯蔵中に、それぞれ、Cm-244 と Pu-241 から崩壊によって生成するためである。表 A-3 に燃料領域を構成する物質の個数密度を示す。今回の検討では、これらの組成を元に次式によって燃料領域の平均個数密度を求めた。

$$D^{Core} = \left\{ (1 - R^{In})(1 - R^{Pu})D^{MA-N} + (1 - R^{In})R^{Pu}D^{Pu-N} + R^{In}D^{Zr-N} \right\} V^{Fuel} + D^{SUS}V^{Clad} + D^{LBE}V^{Cool} \tag{式 A-1}$$

ここで、

D^{Core} : 求める燃料領域の平均個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm³)

D^{MA-N} 、 D^{Pu-N} 、 D^{Zr-N} 、 D^{SUS} 、 D^{LBE} : 表 A-3 に示した個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm³)

R^{In} : 希釈材体積割合

R^{Pu} : アクチニド核種に占める Pu 体積割合

V^{Fuel} 、 V^{Clad} 、 V^{Cool} : 燃料単位セルに占める、燃料ペレット (空隙を含む)、被覆管、及び、冷却材の体積割合、

である。三角配列の体積割合は次式によって求められる。

$$V^{Fuel} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D-2T}{P} \right)^2, \quad V^{Clad} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \frac{D^2 - (D-2T)^2}{P^2}, \quad V^{Cool} = 1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D}{P} \right)^2 \tag{式 A-2}$$

ここで、 D : 燃料ピン径、 T : 燃料被覆管厚さ、 P : 燃料ピンピッチ、である。

また、表 A-4 に燃料領域以外の個数密度を示した。

表 A-2 MA、Pu 組成 (重量比)

	MA	Pu
U-234	0.00%	0.04%
U-235	0.00%	0.00%
U-236	0.00%	0.01%
Np-237	49.65%	0.00%
Pu-238	0.00%	2.38%
Pu-239	0.00%	54.48%
Pu-240	0.32%	24.19%
Pu-241	0.00%	10.85%
Pu-242	0.00%	6.96%
Am-241	32.10%	1.09%
Am-242m	0.06%	0.00%
Am-243	13.37%	0.00%
Cm-242	0.00%	0.00%
Cm-243	0.03%	0.00%
Cm-244	4.04%	0.00%
Cm-245	0.39%	0.00%
Cm-246	0.04%	0.00%

表 A-3 燃料領域構成物質の個数密度($\times 10^{24}$ 個/cm³)

	MA-N	Pu-N	Zr-N	SUS316	LBE	例(Ref ケース)
U-234	0.0000E+00	1.0611E-05				3.9181E-07
U-235	0.0000E+00	0.0000E+00				0.0000E+00
U-236	0.0000E+00	2.6302E-06				9.7120E-08
Np-237	1.3003E-02	0.0000E+00				8.4619E-04
Pu-238	0.0000E+00	6.2072E-04				2.2920E-05
Pu-239	0.0000E+00	1.4146E-02				5.2236E-04
Pu-240	8.2755E-05	6.2562E-03				2.3640E-04
Pu-241	0.0000E+00	2.7944E-03				1.0318E-04
Pu-242	0.0000E+00	1.7851E-03				6.5916E-05
Am-241	8.2668E-03	2.8073E-04				5.4835E-04
Am-242m	1.5388E-05	0.0000E+00				1.0014E-06
Am-243	3.4148E-03	0.0000E+00				2.2223E-04
Cm-242	0.0000E+00	0.0000E+00				0.0000E+00
Cm-243	7.6623E-06	0.0000E+00				4.9864E-07
Cm-244	1.0276E-03	0.0000E+00				6.6875E-05
Cm-245	9.8795E-05	0.0000E+00				6.4294E-06
Cm-246	1.0092E-05	0.0000E+00				6.5674E-07
N-15	2.5927E-02	2.5897E-02	3.0748E-02			8.8723E-03
Zr-nat			3.0748E-02			6.2288E-03
Fe-nat				5.6459E-02		5.5606E-03
Cr-nat				1.5272E-02		1.5042E-03
Ni-nat				9.5509E-03		9.4066E-04
Mo-nat				1.2172E-03		1.1988E-04
Mn-55				8.5026E-04		8.3742E-05
Pb-nat					1.3211E-02	7.8860E-03
Bi-209					1.6336E-02	9.7516E-03
(g/cc)	14.32	14.32	7.09	7.76	10.21	9.08
備考	TD90%、SD85%	TD90%、SD85%	TD90%、SD85%	Fe/Cr/Ni/Mo/ Mn=67.5/17/1 2/2.5/1 (重量)	Pb/Bi=44.5/55 .5 (重量)	R ^{Pu} =36.2%, R ⁿ =66.51%, D=0.765,T=0.05, P=1.1475

表 A-4 燃料領域以外の個数密度

	ターゲット	ガスプレナム	反射体 1	反射体 2	遮蔽体
B-10					1.1804E-02
B-11					4.7511E-02
C-12					1.4829E-02
Fe-nat		6.5994E-03	3.9522E-02	1.1292E-02	1.1292E-02
Cr-nat		1.7852E-03	1.0691E-02	3.0545E-03	3.0545E-03
Ni-nat		1.1164E-03	6.6857E-03	1.9102E-03	1.9102E-03
Mo-nat		1.4228E-04	8.5206E-04	2.4345E-04	2.4345E-04
Mn-55		9.9387E-05	5.9519E-04	1.7006E-04	1.7006E-04
Pb-nat	1.3211E-02	7.8329E-03	3.9899E-03	1.0640E-02	2.6599E-03
Bi-209	1.6336E-02	9.6859E-03	4.9338E-03	1.3157E-02	3.2892E-03
備考			SUS/LBE=7/3	SUS/LBE=2/8	SUS/LBE/B4C =2/2/6

付録 B 被覆管表面温度評価

軸方向の出力分布から、冷却材温度と被覆管表面温度の軸方向分布を以下の式で評価した。
工学的安全係数を考慮しない。

条件・変数：

ピン径 D [m]

ピンピッチ P [m]

軸方向位置 z [m] 原点 = 炉心発熱部下端

冷却材流速 v [m/s]

線出力 $Q(z)$ [W/m]

鉛ビスマス温度 $T_{\text{cool}}(z)$ [K]

鉛ビスマス物性：

密度 ρ [kg/m³] = $-1.218 \times T_{\text{cool}}(z) + 11060$

定圧比熱 C_p [J/kg/K] = 146

熱伝導率 k [W/m/K] = $0.01 \times T_{\text{cool}}(z) + 6.9$

動粘性係数 ν [m²/s] = $0.05497 \times T_{\text{cool}}(z)^{-2} - 5.624E-5 \times T_{\text{cool}}(z)^{-1} + 1.168E-7$

評価式：

ピン一本あたりの流路面積 S [m²] = $\sqrt{3/2} P^2 - \pi D^2/4$

ピン一本あたりの濡れぶち長さ L [m] = πD

等価直径 De [m] = $4 \times S$ [m²]/ L [m]

$Nu = 6.3 + 0.0167 \times Pe^{0.85} \times Pr^{0.08}$

$Pe = Pr \times Re$

$Pr = 0.014$

$Re = De$ [m]/ ν [m²/s] $\times v$ [m/s]

h_{film} [W/m²/K] = k [W/m/K]/ De [m] $\times Nu$

冷却材温度 $T_{\text{cool}}(z)$ [K]

$$= T_{\text{cool}}(0)[K] + \int Q(z)[W/m] / (S[m^2] \times v[m/s] \times \rho[kg/m^3] \times C_p[J/kg/K]) dz$$

被覆管表面温度 $T_{\text{clad}}(z)$ [K] = $T_{\text{cool}}(z)$ [K] + $Q(z)[W/m] / (2 \pi r_{\text{pin}} \times h_{\text{film}})$

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位		記号
	名称	記号	
面積	平方メートル	m ²	m ²
体積	立方メートル	m ³	m ³
速度	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	cd/m ²
屈折率	(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
	名称	記号		
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光量	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		SI 基本単位による表し方
	名称	記号	
粘りのモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ	Gy	m ² ・s ⁻²
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーバ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm=10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ hm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロ	μ	1 μ = 10 ⁻⁶ m