

小型高速炉の炉心・燃料設計研究  
(その4)

— 平成16年度の研究成果のまとめ —

(研究報告)

2005年8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)  
2005

小型高速炉の炉心・燃料設計研究（その 4）—平成 16 年度の研究成果のまとめ—  
（研究報告書）

三田敏男<sup>1)\*</sup>、岡野 靖<sup>1)</sup>、永沼正行<sup>1)</sup>、水野朋保<sup>1)</sup>

要 旨

実用化戦略調査研究の一環として、「長期燃料無交換」と「高い受動的な安全特性」の 2 点を主な着眼点として、高速炉特有の特性を活かした小型高速炉の設計研究を実施している。

平成 16 年度は、魅力ある小型炉の追求の一環として、設計目標を特化した 2 概念を検討対象とした。すなわち、僻地や離島での立地を想定してプラント寿命中燃料無交換とコンパクト化を目指す「長寿命追求型概念」と、炉心寿命は追求せずコンパクト化を目指す「経済性追求型概念」である。本研究では、両概念について、平成 15 年度と同様に出力分布変動が少なく出口温度高温化のポテンシャルの高い Zr 含有率多領域単一 Pu 富化度の高出口温度対応金属燃料炉心をベースとして炉心・燃料設計を実施した。「長寿命追求型炉心」は、長寿命とコンパクト化の観点から、電気出力 50MWe とし燃料無交換の特徴を活用すると共に今後の開発も見込んで燃料スミア密度を高めた燃料ピン、集合体、遮へい体の仕様を設定して、炉心燃料寿命は 30 年で、炉心出口温度 550°C（水素製造の観点）の見通しを得た。その炉心性能は、炉心高さ／等価直径：101cm/182cm、遮へい体外接円径：2.3m、取出平均燃焼度：77GWd/t、燃焼反応度：1.1% $\Delta k/kk'$ 、増殖比：1.07 であり、制御棒反応度収支、燃料健全性、遮へい性能を満たすことを確認した。また、燃焼による反応度変化が小さいため、制御棒の微調整を要しない長期運転の可能性についても示した。なお、安全解析の結果、ATWS 時に受動的炉停止機構（SASS）の作動により炉心・燃料の健全性が確保できる見通しも別報告で示されている。「経済性追求型炉心」は、電気出力 300MWe として FS の大型/中型炉と同様に現状の実績から見込める燃料仕様を設定し、燃料交換間隔は 2 年×4 バッチで、炉心出口温度 550°C の見通しを得た。その炉心性能は、炉心高さ／等価直径：100cm/263cm、取出平均燃焼度：80GWd/t、燃焼反応度：0.5% $\Delta k/kk'$ 、増殖比：1.03 であり、制御棒反応度収支、遮へい性能を満たすことを確認した。遮へい体外接円径は 3.4m であり、平成 15 年度検討の高温化炉心（165MWe、炉心寿命 20 年、炉心高さ：1.3m、遮へい体外接円径：3.9m）と比較すると、電気出力が約 2 倍であるにもかかわらず大幅なコンパクト化を実現していることが分かる。

<sup>1)</sup> 大洗工学センター システム技術開発部 炉心・燃料システムグループ

\* 日本原子力発電（株）からの派遣者

本研究は、実用化戦略調査研究の一環として実施したものである。

## Design Studies on Small Fast Reactor Cores ( iv )

Toshio SANDA<sup>1)\*</sup>, Yasushi OKANO<sup>1)</sup>, Masayuki NAGANUMA<sup>1)</sup>, Tomoyasu MIZUNO<sup>1)</sup>

### Abstract

The core design study has been performed for small fast reactors at two main features of long-life core and enhanced passive safety as part of the “Feasibility Studies on Commercialized Fast Reactor Cycle System (FS)”.

Two concepts of small fast reactors with a different specialized feature were studied as the promising concept in JFY 2004. They are "Long-life Type Concept" which aims at no fuel exchanging in a plant life supposing installation in a remote district and smaller plant size, and "High Economical Efficiency Type Concept" which aims at smaller plant size mainly. In this study, design studies were performed by using a sodium-cooled metal-fueled core with single Pu enrichment fuel which has high potential of small change of space distribution of power density and higher reactor outlet temperature, and was applied to the core design in JFY 2003. The prospect of achievement of the fuel reloading interval of 30 years and outlet temperature of 550°C was acquired for 50MWe "Long-life Type Concept" by using the specifications of fuel, subassembly and shielding structure based on the feature of no fuel exchanging from a viewpoint of higher fuel density. This core has core height / diameter of 101cm /182cm, envelope diameter of radial shielding region of 2.3m, fuel burnup of 77 GWd/t, burnup reactivity of 1.1 %  $\Delta k/kk'$  and breeding ratio of 1.07. Control rod reactivity balance, fuel soundness and shielding performance were checked that these were satisfied. Moreover, since the reactivity change due to burnup was small, the possibility of long-term operation which does not require a control rod movement was also examined. In addition, this core was checked that core melt would be avoided with SASS at ATWS. The prospect of achievement of the fuel reloading interval of 2 years (4 batches) and outlet temperature of 550°C was acquired for 300MWe " High Economical Efficiency Type Concept " by using the similar specifications of the metal-fueled core for medium and large scale reactor of the FS. This core has core height / diameter of 100cm /263cm, fuel burnup of 80 GWd/t, burnup reactivity of 0.5 %  $\Delta k/kk'$  and breeding ratio of 1.03. As the envelope diameter of radial shielding region is 3.4m, this core size is sharply small compared with a small fast reactor core studied in JFY 2004, which has 165MWe, the fuel reloading interval of 20 years, core height of 1.3m, envelope diameter of radial shielding region of 3.9m.

---

<sup>1)</sup> Fuel and Core System Engineering Group, System Engineering Technology Division,  
O-arai Engineering Center

\* attached from The Japan Atomic Power Company (JAPC)

This study was done as part of “ Feasibility Studies on Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System”

目 次

1	はじめに	1
2	平成 16 年度の設計目標	2
2.1	炉心概念の特徴と目標	2
2.2	主要設計条件	2
3	長寿命追求型小型炉	4
3.1	設計条件	4
3.2	炉心パラメータサーベイ	5
3.3	炉心核特性	12
3.4	燃料ピン健全性評価	19
3.5	流量配分計画	30
3.6	遮へい設計	33
3.7	制御棒調整不要な運転期間に関する検討	40
3.8	まとめ	48
4	経済性追求型小型炉	49
4.1	設計条件	49
4.2	炉心パラメータサーベイ	50
4.3	炉心核特性	62
4.4	遮へい設計	70
4.5	まとめ	72
5	おわりに	73
	参考文献	75

## 略 語表

略 語	正式表現	説明
ATWS	Anticipated Transient Without Scram	異常な過渡変化時のスクラム失敗事象
BDI	Bundle Duct Interaction	バンドル - ダクト間相互作用
CDF	Cumulative Damage Fraction	累積損傷和
DDI	Duct Duct Interaction	ダクト - ダクト間相互作用
FBR	Fast Breeder Reactor	高速増殖炉
FS	Feasibility Studies on Commercialized Fast Reactor Cycle System	FBR サイクル実用化戦略調査研究

## 表リスト

表 2.1	平成 16 年度のナトリウム冷却小型高速炉の炉心設計の主要検討条件	3
表 3.2-1	長寿命追求型小型炉の炉心サーベイ計算例	8
表 3.3-1	50MWe 長寿命追求型小型炉の炉心燃料仕様、炉心特性	13
表 3.3-2	50MWe 長寿命追求型小型炉の装荷・取出時の重金属重量	14
表 3.3-3	50MWe 長寿命追求型小型炉の反応度係数	15
表 3.3-4	50MWe 長寿命追求型小型炉の動特性パラメータ	15
表 3.3-5	50MWe 長寿命追求型小型炉の制御棒反応度収支	16
表 3.4-1	サーベイ計算用小型炉心の設定した解析ケースの一覧	24
表 3.4-2	サーベイ計算用小型炉心の炉心・燃料仕様及び製造公差の設定値	24
表 3.4-3	サーベイ計算用小型炉心の最大線出力履歴の設定値	25
表 3.4-4	サーベイ計算用小型炉心の被覆管最高温度履歴の設定値	25
表 3.4-5	サーベイ計算用小型炉心の工学的安全係数（金属燃料炉心）	26
表 3.4-6	サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚と ガスプレナム長に関するサーベイ結果（Zr 含有率 10 wt. %）	27
表 3.4-7	サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚と ガスプレナム長に関するサーベイ結果（Zr 含有率 6 wt. %）	27
表 3.6-1	長寿命追求型小型炉の遮へい層数・厚さと高速中性子照射量	36
表 3.7-1	長寿命追求型小型炉の等温温度係数	45
表 3.7-2	長寿命追求型小型炉の炉心流量制御／固定方式と炉心反応度変化 及び制御棒調整間隔	46
表 4.2-1	経済性追求型小型炉の 3 領域炉心サーベイ計算結果	52
表 4.2-2	経済性追求型小型炉の 2 領域炉心サーベイ計算結果	56
表 4.2-3	高出口温度対応（BREST 型）ナトリウム冷却炉心の規格化包絡熱出力の比較	57
表 4.2-4	経済性追求型小型炉の制御棒挿入効果（パーク位置）	58
表 4.2-5	高出口温度対応（BREST 型）ナトリウム冷却炉心の検討例の炉心仕様と 主要特性の比較	59
表 4.3-1	経済性追求型小型炉選定炉心の主な核特性評価結果	63
表 4.3-2	経済性追求型小型炉の炉心仕様及び炉心特性の比較	64
表 4.3-3	経済性追求型小型炉の装荷時と取出し時の物量収支	65
表 4.3-4	経済性追求型小型炉の制御反応度収支（平衡炉心）	66
表 5.1	平成 16 年度のナトリウム冷却小型炉の設計仕様と主要炉心特性	74

図リスト

図 3. 2-1	50MWe 小型炉心の燃焼反応度、炉心寿命と炉心サイズ <sup>1)</sup> の関係	9
図 3. 2-2	50MWe 小型炉心の燃焼反応度と炉心直径の関係	10
図 3. 2-3	50MWe 長寿命追求型小型炉心のサーベイ計算結果のまとめ	11
図 3. 3-1	50MWe 長寿命追求型小型炉の炉心配置と 2 次元 RZ 体系図	17
図 3. 3-2	50MWe 長寿命追求型小型炉の実効増倍率及び最大線出力の径時変化	18
図 3. 3-3	50MWe 長寿命追求型小型炉の径方向出力分布	18
図 3. 4-1	サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚と 上部ガスプレナム長の関係 (Zr 含有率 10 wt.%)	28
図 3. 4-2	サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚と 上部ガスプレナム長の関係 (Zr 含有率 6 wt.%)	28
図 3. 4-3	50MWe 長寿命追求型小型炉の設計炉心のガスプレナム長の設定に用いた関係図	29
図 3. 5-1	50MWe 長寿命追求型小型炉の流量配分計画及び被覆管内面最高温度	31
図 3. 5-2	50MWe 長寿命追求型小型炉の炉心内集合体番号	32
図 3. 6-1	長寿命追求型ナトリウム冷却小型炉 (ループ型概念) の原子炉容器構成図 及び遮へい計算体系領域	37
図 3. 6-2	長寿命追求型小型炉の遮へい計算用 2 次元 RD 体系図	37
図 3. 6-3	長寿命追求型小型炉の遮へい層厚さと高速中性子照射量	38
図 3. 6-4	長寿命追求型小型炉の「SUS 遮へい体 1 層 + Zr-H 遮へい体 1 層」 構成における高速中性子照射量の径方向分布	38
図 3. 6-5	50MWe 長寿命追求型小型炉の高速中性子照射量の径方向分布	39
図 3. 7-1	長寿命追求型小型炉の小型炉の燃焼反応度変化	47
図 4. 2-1	DDI 回避のための集合体配列ピッチと必要ラップ管間初期ギャップの関係	60
図 4. 2-2	経済性追求型小型炉の 3 領域炉心 (ケース 12F) と 2 領域炉心 (ケース 12F) の径方向出力分布の比較	61
図 4. 3-1	経済性追求型小型炉選定炉心の炉心配置図	67
図 4. 3-2	経済性追求型小型炉選定炉心の 2 次元 RZ 体系図	68
図 4. 3-3	経済性追求型小型炉選定炉心の炉心燃料集合体概略構成図	69
図 4. 4-1	経済性追求型小型炉の高速中性子照射量 (60 年照射) の径方向分布	71



## 1 はじめに

近年、電力自由化への対応や、エネルギー需要との整合性の観点より、電力需要に柔軟に対応でき、投資リスクの小さい分散電源の導入が重要視されている。また、原子力シェアの維持、拡大を狙って、電力供給以外に原子力による水素製造、熱供給などの多目的利用が注目されており、スケールメリットを指向した大型炉に代えて、小型炉の検討が進められている。

平成 11 年 7 月から開始した FBR サイクル実用化戦略調査研究では、「長期燃料無交換」と「高い受動的な安全特性」の達成を主目標として、高速炉特有の特性を活かした小型高速炉の設計検討を行っている。

平成 12 年度（フェーズ I）の検討では、50MWe 出力、30 年間燃料無交換運転の鉛ビスマス冷却の自然循環炉、及びナトリウム冷却の自然循環炉、制御棒制御強制循環炉、反射体制御強制循環炉を検討した<sup>[1]</sup>。平成 13 年度（フェーズ II-1）からは、さらに「経済性の改善」を視野に入れ、出力を 150MWe とした 10 年間燃料無交換ナトリウム冷却小型炉の設計検討を行った<sup>[2]</sup>。

平成 14 年度（フェーズ II-2）には、反応度制御方式の違いや冷却材循環方式の違い、そして出力の違いが小型炉の特性や経済性にどう影響するかを把握する目的で、150MWe 反射体制御型・強制循環炉心、150MWe 制御棒制御型・強制循環炉心、150MWe 制御棒制御型・自然循環冷却、そして 50MWe 出力制御棒制御型・強制循環炉心の 4 通りのナトリウム冷却炉心を検討した<sup>[3]</sup>。

平成 15 年度（フェーズ II-3）には、これまでの検討結果を踏まえて小型炉の魅力をもっと追求して、150MWe 級の制御棒制御型・ナトリウム冷却強制循環炉を対象として燃料無交換期間を 20 年に延長しつつ、多目的利用も視野に入れて原子炉出口温度を高温化し、経済性向上の観点から出来るだけコンパクト化することを指向した炉心概念を検討した。本概念は、炉心寿命と安全性に関する特徴を有しながら経済性の目標も満足できることから小型炉の基本概念と位置づけることができる。しかし、本概念は出力当りの炉心サイズが大きく、経済性観点からは必ずしも魅力ある概念とは言えない<sup>[4]</sup>。

本報告の平成 16 年度は、小型炉と特徴として期待される①優れた安全性、②コンパクトなシステム、③炉心長寿命化を同時に追求するのではなく、開発目標を特化した 2 概念を検討対象とした。すなわち、僻地や離島での立地を想定してプラント寿命中燃料無交換とコンパクト化を目指す「長寿命追求型概念」と、炉心寿命は追求せずコンパクト化を目指す「経済性追求型概念」である。

## 2 平成 16 年度の設計目標

### 2.1 炉心概念と特徴と目標

本報告の平成 16 年度は、小型炉の特徴として期待される①優れた安全性、②コンパクトなシステム、③炉心長寿命化を同時に追求するのではなく、開発目標を特化した 2 概念を検討対象とした。すなわち、僻地や離島での立地を想定してプラント寿命中の燃料無交換を目指す「長寿命追求型概念」と、炉心寿命は追求せずコンパクト化などによりできる限り経済性向上を目指す「経済性追求型概念」である。

#### (i) 長寿命追求型概念

僻地及び離島への立地を想定し、プラント寿命中は燃料交換しないことを目標とするが、経済性向上も念頭に置いて炉心はできる限りコンパクト化する。電気出力は 50MWe 程度、燃料交換間隔は 30 年～60 年、炉心出口温度 550℃（水素製造の観点）を目標として、昨年度検討の高出口温度対応金属燃料炉心をベースに検討する。

また、安全性については、受動的炉停止機構（SASS）により炉心・燃料の健全性が確保できることを目標とする。

#### (ii) 経済性追求型概念

都市近接立地を想定し、炉心長寿命化は追求せず、炉心はコンパクト化を目指し、プラントはできるだけ新しい概念の採用により、可能な限り経済性を向上する。電気出力は 300MWe 程度、燃料交換間隔は 2 年程度、炉心出口温度 550℃（経済性向上と水素製造の観点）を目標として、昨年度検討の高出口温度対応金属燃料炉心をベースに検討する。

なお、経済性については、できる限り中型/大型炉並に近づけることを目指す。また、安全性については、受動的炉停止機構（SASS）により炉心・燃料の健全性が確保できることを目標とする。

### 2.2 主要検討条件

本年度のナトリウム冷却小型高速炉の炉心設計の主要検討条件を表 2.1 に示す。

長寿命追求型概念は、プラント寿命中の燃料無交換を目標とするので、この特徴をできるだけ活用した仕様とすると共に今後の開発も見込んだ検討条件を設定して、できる限り炉心コンパクト化を目指す。

経済性追求型概念は、中型/大型炉の高出口温度型金属燃料炉心と同等の、燃料仕様が現状の実績から見込める条件（直近許認可性を考慮）として、できる限り炉心コンパクト化を目指す。

検討対象炉心は、両概念とも昨年度まで検討してきた高出口温度対応金属燃料炉心概念を採用して、出口温度 550℃を目標とする。本年度は、更なる炉心コンパクト化を狙うため、金属燃料の Zr 含有率と共にスミア密度（昨年度は固定）も径方向に可変とする。Zr 含有率は、昨年度は 10wt%以上の条件であったが、燃料製造の観点から Zr 含有率を 10 wt%以下とする制限目安があることを考慮して、ANL での製造・照射実績の多い Zr 含有率（6～10 wt%）を設計条件とする。

表2.1 平成16年度のナトリウム冷却小型高速炉の炉心設計の主要検討条件

項目	長寿命追求型	経済性追求型
基本方針	燃料密度を高める観点から燃料無交換の特徴を活用した条件	中型/大型炉と同等の燃料仕様現状の実績から見定める条件
原子炉出力(MWt/MWe)	120/50	714/300
制御・冷却方式	制御棒制御・強制循環冷却	←
原子炉出口(°C)	550	←
運転サイクル長さ(年)	30	2
燃料交換バッチ数	1	3~5
炉心型式	単一Pu富化度3領域均質*	単一Pu富化度2領域均質*
燃料形態	3元合金燃料(U-TRU-Zr)	←
燃料ピン外径(mm)	15以下**	8.5***
スミア密度(%)	70~85**	70~75***
Zr充填率%	6~10***	←
燃料集合体	ダクト付き燃料集合体(燃料無交換の観点からラッパ管肉厚、集合体間ギャップ合理化)	ダクト付き燃料集合体(DDI回避の観点からラッパ管肉厚、集合体間ギャップ設定)
最大高速中性子照射量(n/cm <sup>2</sup> )	5 × 10 <sup>23</sup> (E>0.1MeV)以下	←
遮へい性能(炉心槽のフルエンス)	4 × 10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> (E>0.1MeV)以下	←

\*低Pu富化度1種類で、径方向にZr含有率とスミア密度の違いにより燃料重量比を変えて出力分布の空間的・時間的変化を低減して、出口温度高温化のポテンシャルを有する炉心概念

\*\*製造実績があり今後の照射試験で達成見通しあり

\*\*\*製造/照射実績があり今後の試験で達成見通し大

### 3 長寿命追求型小型炉

#### 3.1 設計条件

長寿命追求型小型炉の炉心の設計条件は、プラント寿命中燃料無交換を目標とするので、この特徴をできるだけ活用した仕様とすると共に、今後の開発も見込んだ検討条件を設定してできる限り炉心コンパクト化も目指す。平成 16 年度検討の中型及び大型の高出口温度対応金属燃料炉心を参考としつつ、燃料無交換の特徴を活用し今後の開発も見込んで下記の条件とする（表 2.1 参照）。

- ・原子炉出力（電気／熱）：50MWe／120MWt
- ・原子炉出力／入口温度：550℃／395℃
- ・運転サイクル長さ：30 年程度
- ・炉心高さ：100cm 程度以下
- ・燃焼反応度：2%  $\Delta k/kk'$  程度以下
- ・取出平均燃焼度：100 GWd/t 程度
- ・高速中性子照射量： $5 \times 10^{23}n/cm^2$  以下
- ・燃料形態：U-Pu(TRU)-Zr（ボンド材：ナトリウム）  
スミア密度 70～85%、Zr 含有率 6～10wt%
- ・原子炉材料：ODS 鋼、PNC-FMS 鋼
- ・集合体仕様：ラップ管付、肉厚 2mm、ラップ管間ギャップ 1mm  
[プラント寿命中燃料無交換のため通常の燃料交換機による燃料引抜性の要求を緩和]
- ・スペーサ型式：ワイヤ
- ・燃料ピン間ギャップ：1mm 以上
- ・プルトニウム富化度：全領域同一（1 種類）
- ・燃料ピン径：15mm 程度（1 種類）
- ・炉心領域数：3 領域
- ・核定数：統合炉定数 ADJ2000R
- ・燃料組成：高速炉多重リサイクル組成  
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$   
=1. 1/54. 1/32. 1/4. 3/3. 9/0. 5/2. 0/1. 0/1. 0wt%

## 3.2 炉心パラメータサーベイ

### 3.2.1 予備的サーベイ

炉心パラメータサーベイ計算に先立ち、平成 15 年度の電気出力 165MWe (395MWt) の高温小径化炉心 (出口温度高温対応金属燃料炉心、炉心高さ 164cm、炉心等価直径 263cm、遮へい体外接円径 334 cm、増殖比 1.07、燃焼反応度  $1.5\% \Delta k/kk'$ ) の燃料組成、炉心配置をベースとして長寿命炉心 (30~60 年寿命) の予備的サーベイ計算を実施した。本サーベイは、炉心寿命 30 年と 60 年で燃焼反応度をパラメータとして、どの程度のコンパクト化が図れるかについての知見を得るための予備的な検討である。

電気出力 50MWe (120MWt) 小型炉心の燃焼反応度、炉心寿命と炉心サイズの関係を図 3.2-1 に示す。燃焼反応度が大きいほど、また炉心寿命が短いほど炉心がコンパクトになることが分かる。また、炉心高さが低くなるほど、中性子の漏れが増して中性子経済が悪くなり、益々炉心径が大きくなる傾向にある。今回のサーベイ計算では、高温小径化炉心の燃料組成を共通に用いているが、炉心高さが低くなると、同一の炉心圧損条件では燃料ピッチをつめて、燃料体積率を高めることができるので、炉心高さが低い場合には、炉心圧損条件を同一にすると炉心径は図 3.2-1 より小さくできる。50MWe 小型炉心の炉心寿命 30 年と 60 年の場合について、炉心高さ 160cm における燃焼反応度と炉心等価直径の関係を図 3.2.-2 に示す。

本検討の高出口温度対応金属燃料炉心では燃焼反応度を  $1\sim 2\% \Delta k/kk'$  程度に抑える必要があるが、この予備検討では燃焼反応度の制限のない場合の炉心性能に与える効果を概算したものである。例えば、60 年寿命の場合には、燃焼反応度  $1\% \Delta k/kk'$  で炉心径は 270cm に対して、燃焼反応度  $10\% \Delta k/kk'$  で 225cm となり 45cm 短縮 (約 17%減) する。また、炉心寿命の差に着目すると、燃焼反応度  $1\% \Delta k/kk'$  では炉心径は 60 年炉心で 270cm に対して、30 年炉心で 255cm であり 15cm 短縮 (約 6%減) されるが、燃焼反応度  $10\% \Delta k/kk'$  では炉心径は 60 年炉心で 225cm に対して、30 年炉心で 190cm となり、35cm 短縮 (約 16%減) される。

本検討の炉心概念は、安全性の観点から炉心高さ 100cm 程度以下、高出口温度対応炉心の実現のため燃焼反応度  $2\% \Delta k/kk'$  程度以下が条件となるので、炉心コンパクト化のためには大幅な仕様の変更の検討が必要となる。

### 3.2.2 炉心コンパクト化のための検討

長寿命追求型小型炉の特徴を踏まえて、種々の仕様を変更した場合の炉心コンパクト化への効果を検討した。

ここでは、炉心コンパクト化のために平成 15 年度小型炉の炉心設計の仕様 (燃料スミア密度 75wt%、燃料ピン径 15mm、被覆管肉厚 0.89mm、ラップ管の肉厚 5mm、ラップ管間ギャップ 3.8mm、径方向遮へい体構成 SUS1 層+Zr-H1 層) を出発点として、長寿命追求小型炉の特徴を踏まえて仕様を下記のように変更することについて検討した。仕様変更の内容とその効果について以下に説明する。

本検討のスタートとなる H15 仕様小型炉心 (平成 15 年度設定値) は、上記の平成 15 年度の炉

心仕様を用いて設定した 50MWe 長寿命追求型小型炉心である。

#### (1) 燃料仕様

燃料の実効的な密度を向上するため、金属燃料のスミア密度を 70～85 wt% (H15;75wt%) とし、Zr 含有率を 6～10 wt% (H15;10 wt%以上) とする。前者の燃料スミア密度 85 wt%は開発要素の大きい仕様であるが、後者の Zr 含有率は ANL での製造・照射実績もあり、燃料製造の観点から Zr 含有率を 10 wt%以下とする制限目安があることを考慮したものである。さらに、燃料ピン径は 15mm と平成 15 年度と同一とするが、燃料体積率を向上するため集合体当りのピン本数を 127 本 (H15;91 本) とする。

#### (2) 燃料ピン仕様

低線出力・低燃焼度特性の活用とガスペナム長の延長 (炉心の高さの 1 倍から 1.5 倍) により、被覆管肉厚 0.78mm (H15; 0.89mm) まで薄肉化する。この成立性については、フープ応力や CDF 解析により 3.4 節の「燃料ピン健全性評価」において確認する。

#### (3) ラップ管仕様

プラント寿命中燃料無交換のため通常の燃料交換機による燃料引抜性の要求を緩和できるため、ラップ管の肉厚 2mm (H15;5mm)、ラップ管間ギャップ 1mm (H15;3.8mm) とする。

#### (4) 遮へい体仕様

SUS1 層+Zr-H1 層から SUS0.5 層+Zr-H0.5 層の非六角構造を適用する。本構造による炉心廻りの遮へい性能の観点からの成立性は、3.6 節の「遮へい設計」で確認する。

本検討の 30 年間燃料無交換の金属燃料炉心は、出口温度高温化を指向するため、平成 15 年度と同様に、出力変動が小さい Zr 含有率 3 領域単一 Pu 富化度炉心を採用した。この炉心概念は、高速炉の高い内部転換性能 (燃焼による反応度劣化小) を活用して、低 Pu 富化度 1 種類で径方向に燃料重量割合を変えて (本検討では 3 領域) 出力分布の空間的・時間的変化を小さくして、大型炉及び中型炉のナトリウム冷却 MOX 燃料炉心並みの高温条件に適合する炉心概念である。この炉心概念は、当初はピン径を領域ごとの 3 種類としてナトリウム冷却中型炉金属燃料炉心でその実現の可能性を示した<sup>[5]</sup>が、本検討ではピン径・Pu 富化度 1 種類で領域ごとに金属燃料 (U-TRU-Zr の 3 元合金) の Zr 含有率 (及び燃料スミア密度) を変えることにより、同様の効果を狙ったものである。

この 50MWe 小型炉心に対して、2 次元 RZ 体系拡散計算 (統合炉定数 ADJ2000R を用いて CITATION コードを使用) でのサーベイ計算を実施した。炉心は Zr 含有率 3 領域単一 Pu 富化度金属炉心であり、炉心寿命 30 年、燃焼反応度は  $2\% \Delta k/k'$  程度以下としている。

本検討のスタートとなる H15 仕様小型炉心 (平成 15 年度設定値) から仕様を変更した場合のサーベイ計算結果をまとめて図 3.2-3 に示す。本図は、横軸が仕様変更項目で、平成 15 年度設定値から右に進むに従い仕様が徐々に変更されていくことを示している。縦軸左側は実効重金属

(HM) 体積率であり、仕様変更と共に徐々に増加しており、縦軸右側は遮へい体外接円径/炉心等価直径であり、仕様変更と共に徐々に減少しており、炉心がコンパクトになっていくことが分かる。

遮へい体外接円径の平成 15 年度設定値からの低減割合に着目すると、(1) 燃料仕様の変更により 8%、更に(2) 燃料ピン仕様の変更により 22%、更に(3) ラップ管仕様の変更により 30%、更に(4) 遮へい体仕様の変更により 40%低減することが分かる。

本研究では、これらの仕様変更を全て取り込んで、炉心設計を実施することにした。

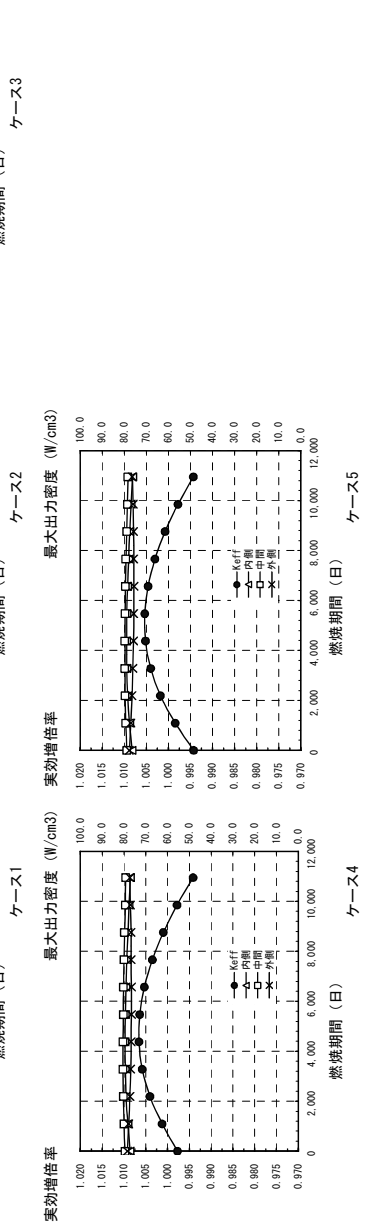
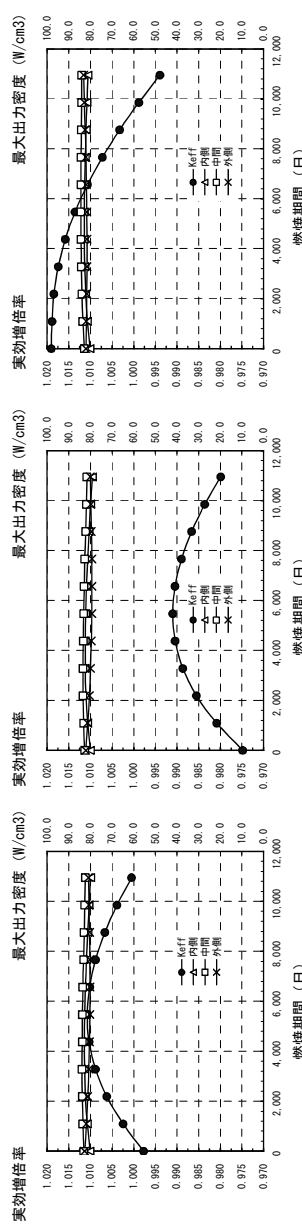
### 3.2.3 燃料仕様設定のためのサーベイ計算

上記の検討に基づき、炉心仕様として、燃料ピン径 15mm、被覆管肉圧 0.78mm、集合体当りのピン本数 127 本、ラップ管の肉厚 2mm、ラップ管間ギャップ 1mm、炉心高さ 100cm 程度などの条件の下で、炉心高さ、集合体数、内側/中間/外側炉心の領域区分、Pu 富化度、スミア密度などをパラメータとして、炉心寿命 30 年で燃焼反応度ができるだけ小さく (1~2%  $\Delta k/kk'$  程度) なる燃料仕様をサーベイした。

サーベイ計算の結果の一例を表 3.2-1 に示す。これらの結果から、燃焼に伴う実効増倍率や出力密度の変化が小さいケース 5 の燃料仕様を選定し、この燃料仕様に基づいて長寿命追求型小型炉心の炉心設計を実施することにした。

表 3.2-1 長寿命追求型小型炉の炉心サーベイ計算例

	ケース1			ケース2			ケース3			ケース4			ケース5		
	内側	中間	外側	内側	中間	外側	内側	中間	外側	内側	中間	外側	内側	中間	外側
燃料ピッチ (mm)	15.0	→	→	15.0	→	→	15.0	→	→	15.0	→	→	15.0	→	→
燃料層肉厚 (mm)	0.60	→	→	0.78	→	→	0.78	→	→	1.00	→	→	1.00	→	→
燃料ピッチ間ギャップ (mm)	1.00	→	→	1.00	→	→	1.00	→	→	1.00	→	→	1.00	→	→
燃料ピッチ本数 (本)	127	→	→	127	→	→	127	→	→	127	→	→	127	→	→
タグト肉厚 (mm)	2.0	→	→	2.0	→	→	2.0	→	→	2.0	→	→	2.0	→	→
集合体間ギャップ (mm)	1.0	→	→	1.0	→	→	1.0	→	→	1.0	→	→	1.0	→	→
集合体ピッチ (cm)	18.83	→	→	18.83	→	→	18.83	→	→	18.83	→	→	18.83	→	→
炉心高さ (cm)	95.0	→	→	95.0	→	→	95.0	→	→	100.0	→	→	101.0	→	→
ガスプレナム高さ (cm)	142.5	→	→	142.5	→	→	142.5	→	→	150.0	→	→	151.5	→	→
炉心管直径 (cm)	182	→	→	182	→	→	182	→	→	182	→	→	182	→	→
炉心出力 (MWth)	120	→	→	120	→	→	120	→	→	120	→	→	120	→	→
燃焼期間 (年)	30	→	→	30	→	→	30	→	→	30	→	→	30	→	→
スミア密度 (%)	70.0	→	→	70.0	→	→	70.0	→	→	70.0	→	→	70.0	→	→
円筒化度 (wt%)	11.90	→	→	11.90	→	→	12.90	→	→	12.20	→	→	12.12	→	→
炉管密度 (wt%)	10.00	→	→	10.00	→	→	10.00	→	→	10.00	→	→	10.00	→	→
金属燃料密度 (wt/cm <sup>3</sup> )	15.80	→	→	15.80	→	→	15.80	→	→	15.80	→	→	15.80	→	→
集合体数 (内側/中間/外側)	15	→	→	15	→	→	15	→	→	15	→	→	15	→	→
制御棒本数 (本)	21	→	→	21	→	→	21	→	→	21	→	→	21	→	→
体積割合 (%)	0.433	0.491	0.526	0.433	0.491	0.526	0.433	0.491	0.526	0.433	0.491	0.526	0.433	0.491	0.526
燃料	0.409	0.352	0.317	0.409	0.352	0.317	0.409	0.352	0.317	0.409	0.352	0.317	0.409	0.352	0.317
冷却材	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157
構造材	6.384E+14	→	→	6.320E+14	→	→	6.320E+14	→	→	6.290E+14	→	→	6.277E+14	→	→
最大高濃中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ·s) 平均	5.436E+23	→	→	5.651E+23	→	→	5.388E+23	→	→	5.356E+23	→	→	5.345E+23	→	→
最大高濃中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> ·a)	1.218	1.287	1.229	1.285	1.290	1.228	1.255	1.273	1.227	1.288	1.290	1.284	1.225	1.284	1.225
後方向レシオ	105.8	108.0	101.6	105.9	107.6	100.9	104.0	107.4	102.1	102.0	103.7	96.0	101.6	103.1	95.2
後方向レシオ * 出力密度最大値															





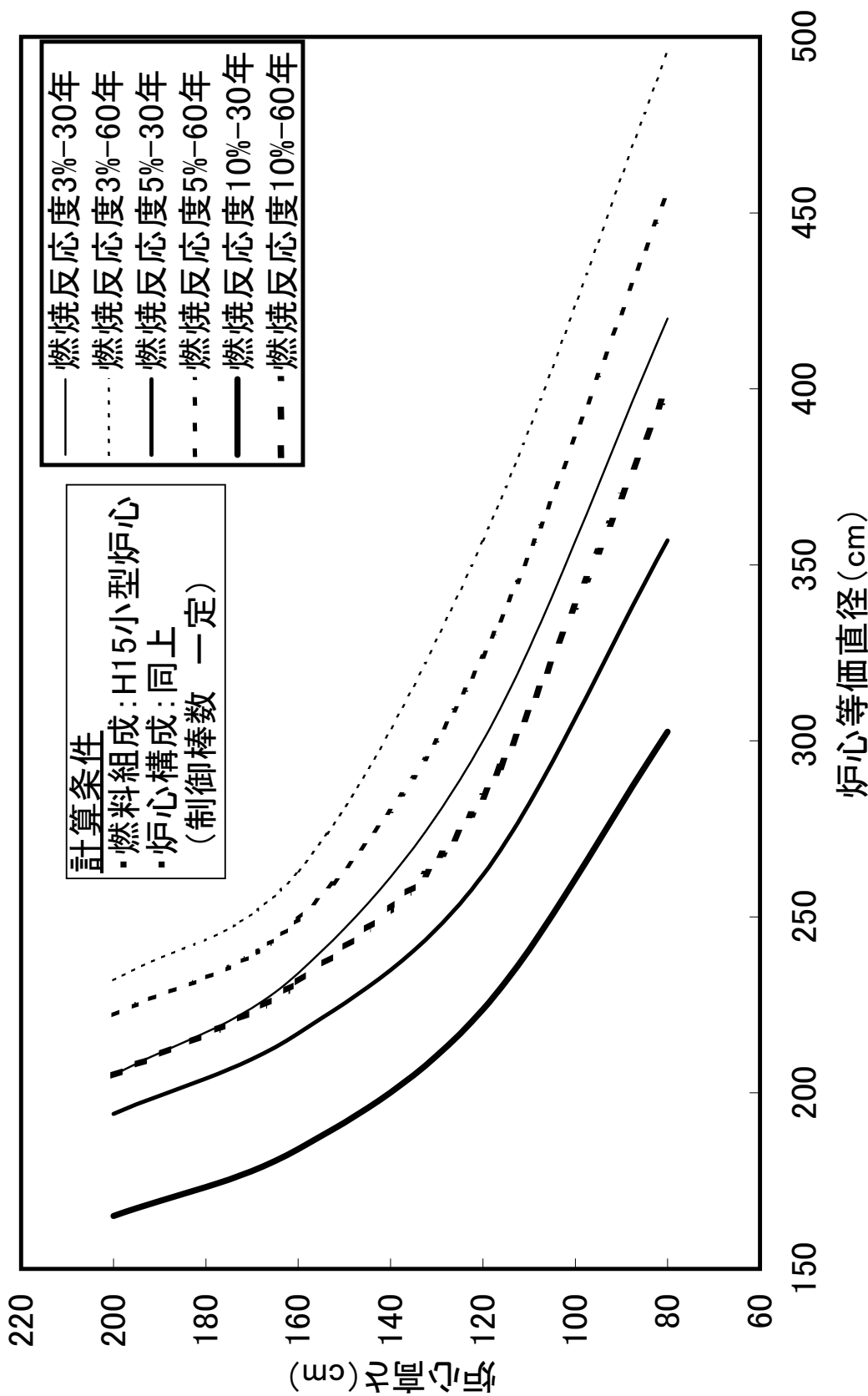


図3.2-1 50MWe小型炉心の燃焼反応度、炉心寿命と炉心サイズの関係

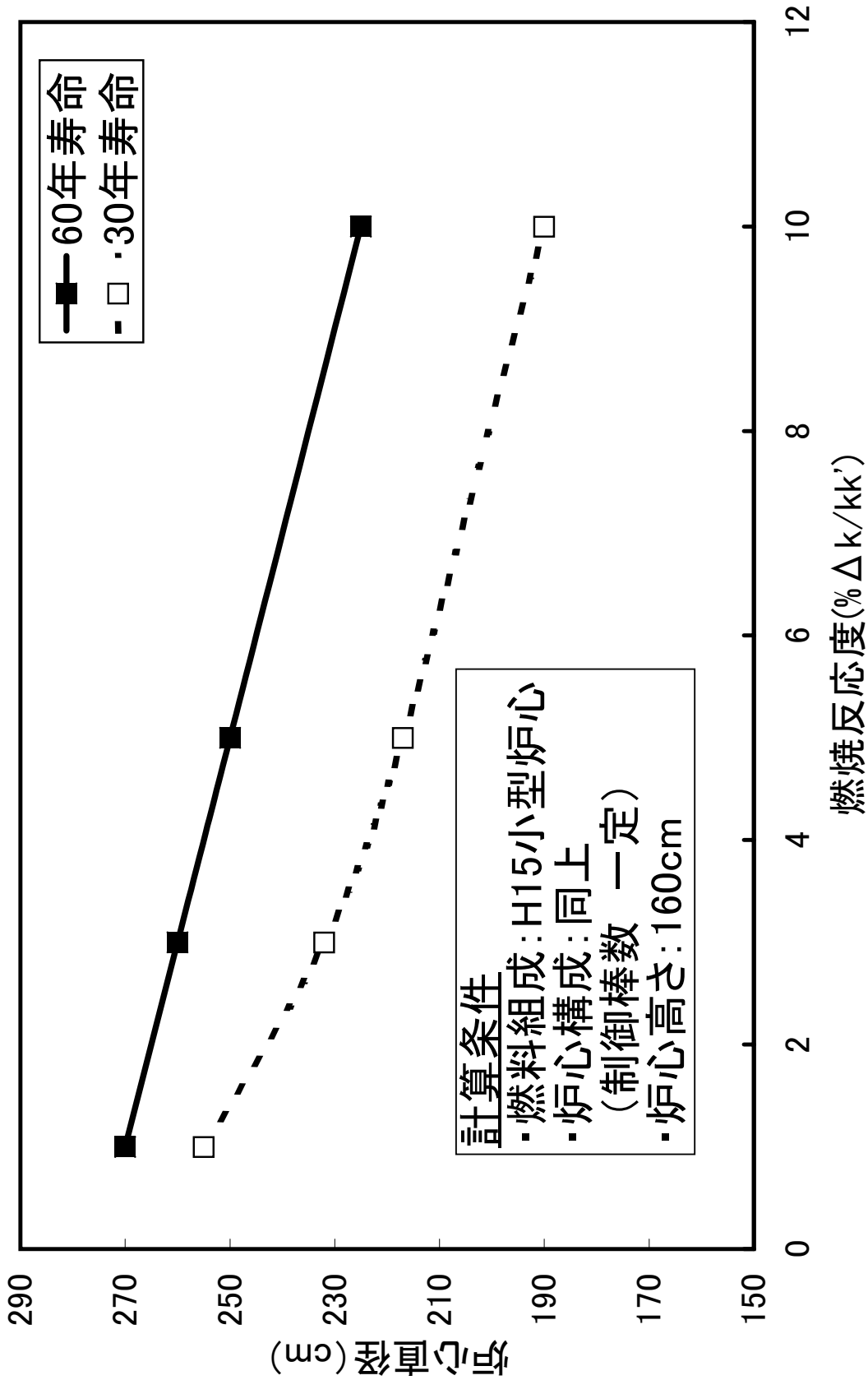


図3.2-2 50MWe小型炉心の燃焼反応度と炉心直径の関係

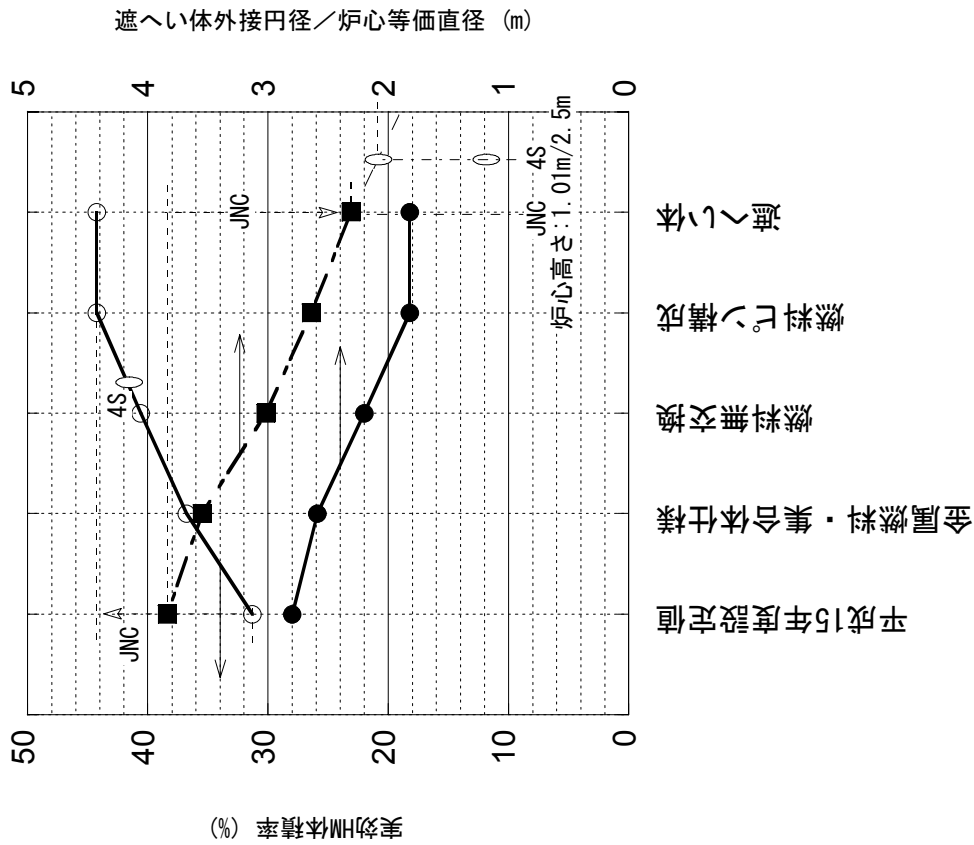


図 3.2-3 50MWe 長寿命追求型小型炉心のサーベイ計算結果のまとめ

- \*燃料仕様
  - スミア密度：75% →70～85%
  - Zr濃度：10%以上→6～10%
  - 燃料本数：91本 →127本
- \*燃料無交換の特性追求
  - ラッパ管肉厚：5mm→2mm
  - ラッパ管間ギャップ：3.8mm→1mm
  - (スエリング/初装荷性考慮)
- \*燃料ピン構成
  - 被覆肉厚：0.89mm→0.78mm
  - 低線出力・低燃焼度特性を活用
  - ガスプレナム長：
    - 炉心高の1倍→1.5倍
    - (フープ応力・ガス内圧・CDF考慮)
- \*遮へい体構成
  - SUS1層+ZrH1層
    - SUS0.5層+ZrH0.5層
  - 複合構成/非六角構造の適用

### 3.3 炉心核特性

上記のサーベイ計算結果に基づいて、長寿命追求型炉心の炉心設計を実施した。炉心設計における核特性評価の主要な手法（燃料組成を含む）を以下に示す。

- ・ 炉定数 : 統合炉定数 ADJ2000R
- ・ 燃焼計算 : 2次元 RZ 体系拡散燃焼計算
- ・ 出力分布計算 : 3次元拡散計算
- ・ 反応度計数計算 : ドップラ係数 1次近似摂動計算  
ボイド反応度 厳密摂動計算
- ・ 制御棒価値計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算

計算値に以下の補正を施し、更に、9%の不確かさを考慮して評価

- ・ 群縮約効果 0.97
- ・ メッシュ効果 0.90
- ・ B<sub>4</sub>C 吸収体マスランピング効果補正 0.87
- ・ 輸送理論補正 0.96

- ・ 燃料組成 : 高速炉多重リサイクル時の TRU 燃料組成

$$\begin{aligned}
 & {}^{238}\text{Pu}/{}^{239}\text{Pu}/{}^{240}\text{Pu}/{}^{241}\text{Pu}/{}^{242}\text{Pu}/{}^{237}\text{Np}/{}^{241}\text{Am} / {}^{242\text{m}}\text{Am}/{}^{242}\text{Am}/{}^{243}\text{Am} \\
 & / {}^{242}\text{Cm}/{}^{243}\text{Cm}/{}^{244}\text{Cm}/{}^{245}\text{Cm} \\
 & = 1.1 / 54.1 / 32.1 / 4.3 / 3.9 / 0.5 / 2.0 / 0.0 / 0.0 / 1.0 \\
 & / 0.0 / 0.0 / 1.0 / 0.0 \text{ (wt\%)}
 \end{aligned}$$

炉心設計により得られた長寿命追求型小型炉心の炉心配置図と2次元 RZ 体系図を図 3.3-1 に、その主要目、主要な燃料仕様、炉心特性を表 3.3-1 に示し、装荷時と取出し時の物量収支を表 3.3-2 に示す。本炉心はブランケット領域を設けておらず、炉心高さ/等価直径は 101cm/182cm、取出平均燃焼度は 77GWd/t、燃焼反応度は 1.1%Δk/k'、増殖比は 1.07 であり、30 年間燃料無交換運転を達成している。本設計炉心の炉心高さ/炉心等価直径/遮へい体外接円径は 1.0 m/1.8 m/2.3m であり、平成 12 年度（フェーズ I）の検討の 50MWe 反射体制御強制循環炉心（炉心寿命 30 年）<sup>[1]</sup> の 0.9m/2.4m/5.0m や、平成 14 年度（フェーズ II-2）検討の 50MWe 制御棒制御強制循環炉心（炉心寿命 10 年）<sup>[3]</sup> の 0.7m/2.4m/2.8m に比べてコンパクト化が実現できている。

実効増倍率及び最大線出力（内側/中間/外側）の経時変化を図 3.3-2 に示し、燃焼初期、中期、末期の径方向出力分布を図 3.3-3 に示す。出力分布の時間的変化が小さく、出口温度高温化に適していることが分かる。また、各種反応度係数を表 3.3-3 に、動特性パラメータを表 3.3-4 に示す。

制御棒反応度収支は表 3.3-5 に示すように満足している。本表において、燃焼補償分は、燃焼反応度不確かさと燃料照射スエリングによる軸方向伸長の効果を考慮している。

表 3.3-1 50MWe 長寿命追求型小型炉の炉心燃料仕様、炉心特性

【出力120MWt/50MWe / 寿命30年 / 出口温度550℃ / 高さ1m 炉心】					
炉心主要特性	ポイド反応度(β) [ $\beta=3.63 \times 10^{-3}$ ]	炉心部	4.28		
		炉心+ガスプレナム	3.26		
	最大燃焼反応度 ( $\% \Delta k/kk'$ )				1.11
	炉心平均燃焼度 (GWd/t)				77
	径方向ビーキング係数	内側炉心	中間炉心	外側炉心	
	最大線出力 (kW/m)	1.29	1.29	1.23	
	ピーク位置燃焼度 (GWd/t)	147	131	105	
	最大高速中性子照射量 ( $n/cm^2$ ) ( $E>0.1MeV$ )	5.3 $\times 10^{23}$ #1			
	核分裂性Pu重量 (装荷時/30年時) (ton)	1.26/1.34 (実質増殖比: 1.06)			
	増殖比(BOC/MOC/EOC)	1.14/1.07/1.01 (名目増殖比: 1.07)			
	炉心圧損(バンドル部/出入口差相当) (MPa)	0.0263/0.0329			
	炉心出口・入口温度 (℃)	550/395			
炉心燃料仕様	炉心出力 (MWth)				120
	燃焼期間 (年)				30
	炉心高さ (cm)				101
	炉心等価直径 (cm)				182
	制御棒体数 (主系/後備系)				5/2
	B <sub>2</sub> Cスタック長 (cm)				101.0
	<sup>10</sup> B同位体組成比 (wt%) (主系/後備系)				20 (天然B) / 30
	B <sub>2</sub> C燃焼度 (最大値相当) (capture/m <sup>3</sup> )				180 $\times 10^{26}$
	ガスプレナム長 (cm)				151.5
	ピン径 (mm)				15.0
	ピン間ギャップ (mm)				1.00
	被覆管肉厚 (mm)				0.78
	ワイヤ 径 (mm)				0.95 #2
	ピッチ (mm)				200.0
	Pu富化度 (wt% [HM])				12.12
		内側炉心	中間炉心	外側炉心	
	Zr重量密度 (wt% [HM+Zr])	10	10	6	
	燃料スミア密度 (%)	70	79	85	
	集合体体数	15	21	42	
	集合体燃料ピン本数 (本)	127			
集合体ピッチ (mm)	188.3				
集合体ダクト肉厚 (mm)	2.0				
集合体間ギャップ (mm)	1.0				
各領域体積割合	燃料	内側炉心	中間炉心	外側炉心	
	ポンドNa	41.08	46.54	49.89	
	ダクト間ギャップNa	17.61	12.15	8.80	
	被覆管	1.06	1.06	1.06	
	ダクト	14.42	14.42	14.42	
	ワイヤー	4.18	4.18	4.18	
	冷却媒体Na	0.33	0.33	0.33	
	21.32	21.32	21.32		

#1: 30年間運転中の実効運転期間割合=0.9相当条件。

#2: ワイヤ-ピン間ギャップ0.05mmを想定。概計算上はワイヤ径1.00mmを仮

表 3.3-2 50MWe 長寿命追求型小型炉の装荷・取出時の重金属重量

装荷時 (BOEC : 0年時) の燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	中間炉心	外側炉心	炉心合計
U235	7.0	11.1	26.5	44.5
U236	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	2317.8	3676.1	8798.3	14792.2
U合計	2324.8	3687.1	8824.8	14836.7
Pu238	3.7	5.9	14.1	23.7
Pu239	182.8	290.0	694.0	1166.7
Pu240	108.5	172.0	411.8	692.3
Pu241	14.5	23.0	55.2	92.7
Pu242	13.2	20.9	50.0	84.1
Pu合計	322.7	511.8	1225.0	2059.6
Np237	1.7	2.7	6.4	10.8
Np合計	1.7	2.7	6.4	10.8
Am241	6.8	10.7	25.7	43.1
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	3.4	5.4	12.8	21.6
Am合計	10.1	16.1	38.5	64.7
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	3.4	5.4	12.8	21.6
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm合計	3.4	5.4	12.8	21.6
合計	2662.7	4223.1	10107.5	16993.4
ソフ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0
随伴FP	17.8	28.3	67.7	113.8
FP合計	17.8	28.3	67.7	113.8

取出時 (EOEC : 30年時) の燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	中間炉心	外側炉心	炉心合計
U235	2.0	4.0	14.3	20.2
U236	0.9	1.3	2.3	4.4
U238	1981.6	3232.2	8152.0	13365.7
U合計	1984.5	3237.4	8168.5	13390.4
Pu238	6.3	9.8	21.1	37.2
Pu239	208.5	327.9	754.8	1291.2
Pu240	99.3	158.2	384.9	642.4
Pu241	8.6	12.6	24.8	46.0
Pu242	10.9	17.7	44.8	73.4
Pu合計	333.7	526.2	1230.4	2090.2
Np237	1.9	3.1	7.4	12.4
Np合計	1.9	3.1	7.4	12.4
Am241	11.9	20.2	55.0	87.1
Am242m	0.8	1.2	2.3	4.2
Am243	3.3	5.2	12.6	21.1
Am合計	15.9	26.6	69.9	112.4
Cm242	0.2	0.2	0.4	0.7
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.1
Cm244	3.7	5.8	13.3	22.8
Cm245	0.6	0.8	1.4	2.7
Cm合計	4.4	6.8	15.1	26.3
合計	2340.4	3800.1	9491.3	15631.8
ソフ化FP	319.4	421.2	620.3	1360.9
随伴FP	17.8	28.3	67.7	113.8
FP合計	337.2	449.5	688.0	1474.7

表 3.3-3 50MWe 長寿命追求型小型炉の反応度係数

●反応度係数		[EOEC組成時]
炉心部燃料ドブラー	$T(\text{dk}/\text{kk}')/dT$	-2.485E-03
炉心部構造材ドブラー		-2.138E-04
燃料密度係数	$\Delta k/\text{kk}'/(\Delta\rho/\rho)$	3.485E-01
冷却材密度係数 [炉心部+ガスブレナム部]		-1.367E-02
冷却材密度係数 [炉心部]		-1.612E-02
構造材密度係数		-3.755E-02
径方向形状係数	$\Delta k/\text{kk}'/(\Delta R/R)$	1.383E-01
軸方向形状係数	$\Delta k/\text{kk}'/(\Delta H/H)$	1.359E-01
●等温温度係数		[EOEC組成時]
炉心部燃料ドブラー	$\Delta k/\text{kk}'/^{\circ}\text{C} \times 10^{-5}$	-0.225
炉心部構造材ドブラー		-0.023
燃料軸方向膨張係数		-0.383
冷却材温度係数 [炉心部+ガスブレナム部]		0.385
冷却材温度係数 [炉心部]		0.454
被覆管温度係数		0.033
ラッパ管温度係数		0.014
炉心支持板温度係数		-0.954

表 3.3-4 50MWe 長寿命追求型小型炉の動特性パラメータ

遅発中性子割合						
$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_{\text{eff}}$
7.917E-05	7.058E-04	6.587E-04	1.334E-03	6.479E-04	2.060E-04	3.632E-03
遅発中性子時定数 (1/sec)						
$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	
0.0130	0.0315	0.1360	0.3480	1.3874	3.8564	
即発中性子寿命(sec)		[何れもEOEC組成時]				
2.09E-07						

表 3.3-5 50MWe 長寿命追求型小型炉の制御棒反応度収支 (単位: %Δk/kk')

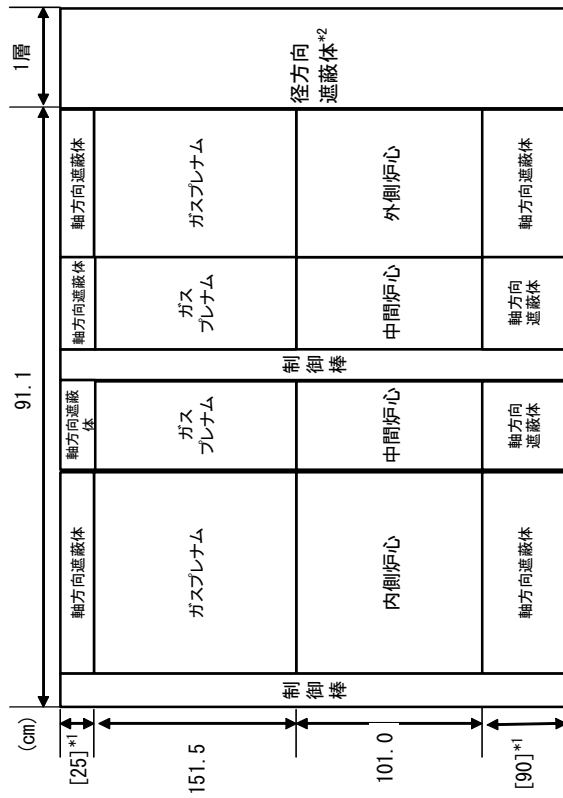
項目	主炉停止系 (ワンドッドスタック)		後備炉停止系	
	ワンドッドスタック	ワンドッドスタック	ワンドッドスタック	全数挿入
(1) 計画余剰反応度	<b>1.81</b>	<b>0.2</b>		<b>0.3</b>
a. 出力補償*1	0.3	0.2		0.3
b. 燃焼補償*2	1.31	-		-
c. 運転余裕	0.2	-		-
(2) 余剰反応度の不確かさ(2σ)	<b>0.44</b>	<b>0.04</b>		<b>0.06</b>
a. 臨界性予測誤差	0	-		-
b. 出力補償予測誤差	0.06	0.04		0.06
c. 燃料製作公差	0.38*3	-		-
d. 燃料交換余裕	-	-		-
(3) 事故時投入反応度	-	<b>0.24*3</b>		<b>0.24*3</b>
(4) 必要制御反応度[(1)+(2)+(3)]	<b>2.25</b>	<b>0.48</b>		<b>0.60</b>
(5) 制御棒価値	<b>2.96</b>	<b>0.67</b>		<b>1.58</b>
(6) 反応度停止余裕[(5)-(4)]	<b>0.71</b>	<b>0.19</b>		<b>0.98</b>

\*1: 燃料[600°C相当]、構造材・冷却材[500°C相当]の冷態停止[180°C]、温態待機[300°C]に要するドブプラ及び温度反応度から導出

\*2: 燃焼反応度不確かさ(0.2%Δk/kk')および燃料照射による軸方向伸長(7%ΔL/L)の影響を考慮

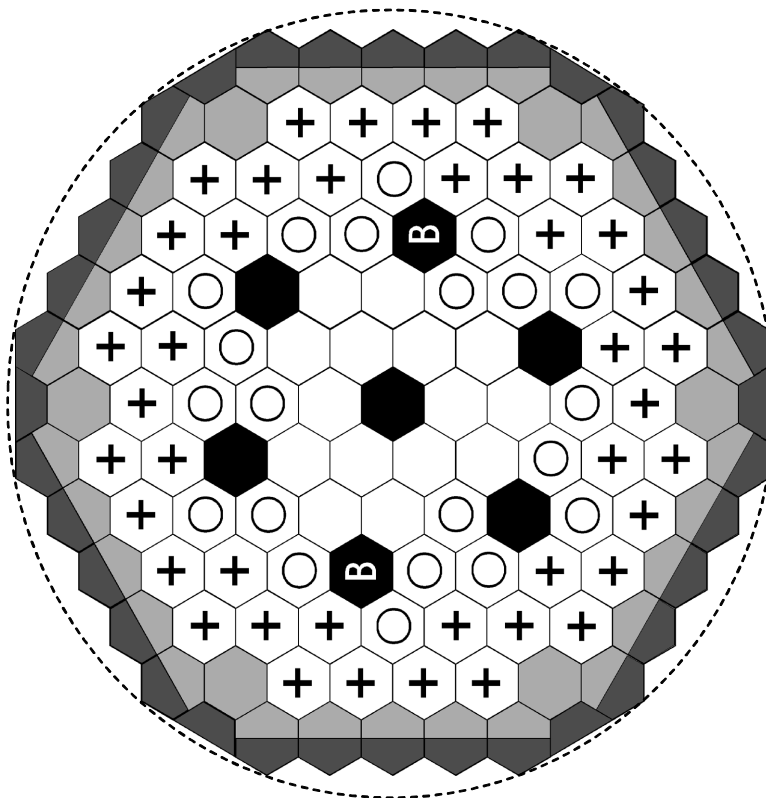
\*3: H15年度・Na小型炉(高出口温度型炉心)の検討に基づき暫定





\*1 核計算上の設定値。今後の燃料集合体詳細設計に応じ変更予定  
 \*2 原子炉供用期間中（60年間）無交換

- 内側炉心燃料集合体 15体
- ⊙ 中間炉心燃料集合体 21体
- ⊕ 外側炉心燃料集合体 42体
- ◐ SUS、ZrH遮蔽体 30体
- ◑ SUS遮蔽体 6体
- ◒ ZrH遮蔽体 6体
- ◓ 主系制御棒 5体
- ◔ 後備系制御棒（SASS） 2体



炉心等価直径： 182cm  
 炉心高さ： 101cm  
 遮へい体外接円径： 231cm

図 3.3-1 50MWe 長寿命追求型小型炉の炉心配置と 2 次元 RZ 体系図

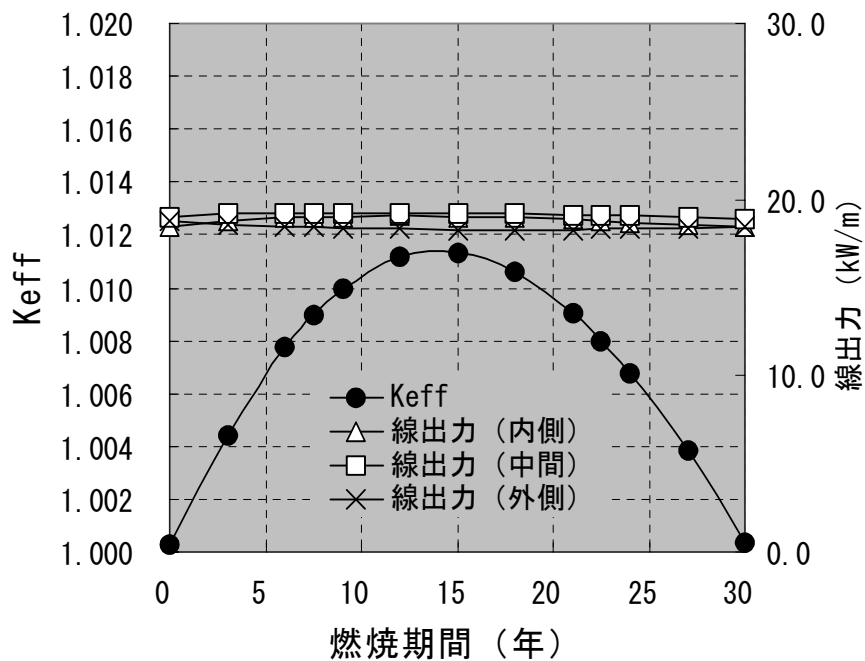


図 3.3-2 50MWe 長寿命追求型小型炉の実効増倍率及び最大線出力の径時変化

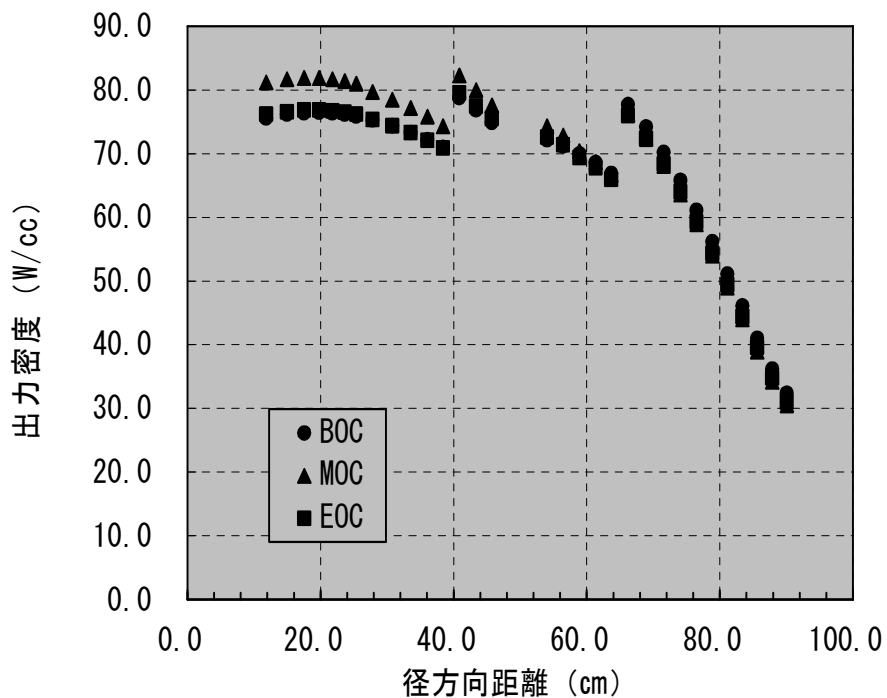


図 3.3-3 50MWe 長寿命追求型小型炉の径方向出力分布

### 3.4 燃料ピン健全性評価

本節では、最初に 50MWe 長寿命型小型炉（炉心寿命 30 年）の燃料仕様設定に関わるサーベイを行う。具体的には、炉心を極力コンパクト化するため、燃料健全性を維持する範囲で、被覆管肉厚とガスプレナム長の関係についてサーベイを行う。次に、この結果に基づき、設計炉心のガスプレナム長を設定して、設計炉心の燃料健全性を確認する。

ここで、燃料健全性としては、被覆管直管部クリープ損傷使用分数和（直管部では疲労の効果小さいことから、本検討では被覆管直管部のクリープ損傷使用分数のみを対象とする；以下 CDF と呼ぶ）と照射末期のフープ応力を考慮する。また、燃料ピン破損時の破損伝播回避の観点から、照射末期ガス内圧についても着目することとした。CDF・フープ応力などの評価については、FS フェーズⅡで採用されている統計処理を適用した手法を用いる。

#### 3.4.1 サーベイ計算

##### (1) 小型炉の基本仕様

本評価ではサーベイ計算用小型炉を設定した。この基本仕様・取合条件・制限条件を以下に示す。

##### [基本仕様]

- ・炉心熱出力 : 120 MWt
- ・炉心出入口温度 : 550°C / 395°C
- ・燃焼期間 : 30 年（1 サイクル）

##### [取合条件]

- ・燃料ピン径 : 15.0 mm
- ・炉心圧力損失 : 平成 15 年度小型炉炉心と同等

##### [制限条件]

- ・被覆管内面温度 : 650°C
- ・Zr 含有率 : 6 ~ 10 wt.%（10 wt.%：内側領域、6 wt.%：外側領域）

##### (2) 評価条件

##### (i) 制限条件

燃料健全性として、CDF・照射末期フープ応力に着目する。両項目の制限条件を以下に示す（照射末期フープ応力については、あくまで暫定的な目安値であり、今後の安全解析の結果、工学的余裕や評価上の保守性の合理化などにより見直すことが考えられる値である）。また、参考として、燃料ピン破損時の破損伝播回避の観点から、照射末期ガス内圧についても着目することし、暫定的に FS 検討の代表的なナトリウム冷却大型炉におけるドライバ燃料相当の値を目安とする。

- ・ CDF : 0.5 ( $S_t$  ベース)
- ・ 照射末期フープ応力 : 120 MPa (目安値)
- ・ 照射末期ガス内圧(参考) : 11.8 MPa (120 atm) (目安値)

(ii) 評価コード

簡易 CDF 評価コード EZLIFE を用いた。

(iii) 統計処理条件

統計処理を適用した CDF・照射末期フープ応力などの評価において、統計処理を適用する項目としては、「スミア密度」「被覆管内径」「被覆管外径」「工学的安全係数」とした。

(4) 解析ケース

解析ケースとしては、燃料健全性上最も厳しい内側領域の燃料(Zr 重量割合 10 wt.%)について、平成 15 年度小型炉炉心と同様の被覆管肉厚 0.89 mm のケースを基準ケースとし、0.8 mm, 0.7 mm, 0.6 mm, 0.5 mm, 0.4 mm まで低減した条件のケースについて、(1)の制限条件を満足する上部ガスプレナム長のサーベイを行うこととした。各解析ケースの主要な条件について表 3.4-1 にまとめた。

(5) 炉心燃料仕様

本評価における、サーベイ計算用小型炉心の主要な仕様、及び、統計処理を適用する各項目の製造公差を表 3.4-2 に示した。ここで、ナトリウム中酸素濃度について、サーベイ計算用小型炉心では、運転期間が 30 年と平成 15 年度小型炉心の 20 年より長期化されているが、運転期間中の燃料交換は行わない概念であり、暫定的に平成 15 年度小型炉心と同程度の外面腐食量となることを想定した((7)で詳細説明)。

(6) 照射条件

① 最大線出力履歴

サーベイ計算用小型炉心における、内側領域の燃料の最大線出力履歴を表 3.4-3 に示した。線出力について、燃焼度の不確かさ分として+3 %を考慮することとした。

② 被覆管最高温度履歴

サーベイ計算用小型炉心における、内側領域の燃料の被覆管最高温度履歴を表 3.4-4 に示した。ここで、「工学的安全係数」に関し統計処理を適用すべく、[基準条件]と[不確かさ考慮条件]の 2 ケースの履歴を設定している。[基準条件]は、工学的安全係数の乗算項までを考慮した値、[不確かさ考慮条件]は、乗算項+統計項まで考慮した値である。今回の小型炉の工学的安全係数としては、FS 検討の中型・大型金属燃料炉心で設定した工学的安全係数をそのまま適用することとし、表 3.4-5 に適用した工学的安全係数を示した。

## (7) 設計評価式

本評価で使用する設計評価式として、被覆材(ODS 鋼)のクリープ破断強度式、金属燃料の被覆管内面腐食式は、平成 15 年度の検討で用いた式を使用した。被覆管外面腐食式(ODS 鋼)、及び、金属燃料スラグの軸方向変形量については、以下の評価式を暫定的に適用することとした。

① 被覆管外面腐食式(ODS 鋼)<sup>[5]</sup>

平成 15 年度小型炉心では、運転期間が 20 年と長期であり、燃料交換のためバウンダリが解放される機会が少ないことから、ナトリウム中の酸素濃度について 1 ppm とし(従来検討では 3 ppm)、外面腐食量が従来より低減することを想定していた。サーベイ計算用炉心では、運転期間が 30 年と平成 15 年度小型炉心の 20 年より更に長期化しているが、暫定的に平成 15 年度小型炉心と同等の腐食量を想定(つまり、ナトリウム中の酸素濃度 0.67 ppm を想定)することとした。

本検討で用いた被覆管外面腐食式を以下に示す。

$$C_{Na} = [C_{R1} + C_{R2} \times t] \times 0x$$

- $C_{Na}$  : ナトリウムによる外面腐食量 ( $\mu\text{m}$ )  
 $C_{R1}$  : 寿命初期の被覆管外面温度における初期腐食量 ( $\mu\text{m} \cdot \text{ppm}^{-1}$ )  
 $\log C_{R1} = 9.078 - 8.251 \times 10^3 / (T+273.15)$   
 $C_{R2}$  : 定常腐食速度 ( $\mu\text{m} \cdot \text{hour}^{-1} \cdot \text{ppm}^{-1}$ )  
 $C_{R2} = 4.1667 \times 10^4 \cdot \exp [-1.7580 \times 10^4 / (T+273.15)]$   
 $T$  : 被覆管外面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $0x$  : ナトリウム中の酸素濃度 (ppm)  
 $t$  : 被覆管外面温度  $T$ 、ナトリウム中の酸素濃度  $0x$  での使用時間 (hour)

## ② 金属燃料スラグの軸方向変形量

スエリングによる金属燃料スラグの軸方向変形量としては、平成 14 年度「金属燃料設計制限因子検討 WG」において、核燃料 Gr. で設定した以下の暫定評価式を適用することとした。

$$\frac{\Delta L}{L} = (1 - f_{\text{crack}}) \times \left\{ \sqrt{\frac{100}{SD}} - 1 \right\}$$

- $\Delta L/L$  : 燃料軸方向変形量最大値 (-)  
 $SD$  : スミア密度 (%TD)  
 $f_{\text{crack}}$  : 以下の通り (ここで、 $q$ : 線出力(W/cm)、 $D$ : 製造時燃料スラグ直径(cm))

$q/D \leq 710 \text{ W/cm}^2$  の場合

$$\begin{aligned} f_{\text{crack}} &= 0.43 \quad (\text{Pu 非含有燃料}) \\ &= 0.55 \quad (8 \text{ wt.} \% \leq \text{Pu 濃度}(C)) \end{aligned}$$

$q/D > 710 \text{ W/cm}^2$  の場合

$$\begin{aligned} f_{\text{crack}} &= 0.43 \quad (\text{Pu 非含有燃料}) \\ &= 0.491 + 0.0136 \times C \quad (8 \text{ wt.} \% \leq \text{Pu 濃度}(C) \leq 19 \text{ wt.} \%) \\ &= 0.75 \quad (19 \text{ wt.} \% \leq \text{Pu 濃度}(C)) \end{aligned}$$

燃料スラグの軸方向変形量は、ボンドナトリウムの液位上昇に影響を与える。液位上昇量としては、上記評価式による軸方向の変形、及び、径方向には被覆管内面に接触するまで膨らむことを想定するとともに、保守的にボンドナトリウムの燃料スラグ中への侵入はないものとし見積ることとした。結果として、サーベイ計算用小型炉心の仕様では、ボンドナトリウム液位の上昇は炉心高さの 26 % となり、保守的に照射初期からその分の上部ガスプレナム容積が減少していることを想定した。

### (3) 評価結果

内側領域の燃料(Zr 重量割合 10 wt. %)について、被覆管肉厚を基準値(0.89 mm)から、~0.4 mm まで低減した各ケースにおいて、制限条件の範囲で最短となる上部ガスプレナム長を評価した結果を表 3.4-6、及び、図 3.4-1 に示した。本表には、「ピン平均燃焼度」「照射末期ガス内圧」「被覆管外面腐食」「被覆管内面腐食」「照射末期フープ応力」「CDF」の計算結果(統計処理適用)を併せて示した。

各ケースについて、燃料健全性の観点から制限となる条件は、照射末期のフープ応力であり、CDF は 0.05 程度と制限に対し余裕がある結果であった。これは、ODS 鋼を採用した金属燃料炉心全般に見られる傾向であり、金属燃料では液相形成の制限から被覆管温度が抑えられており、被覆材として ODS 鋼を採用した場合、CDF の蓄積が小さくなるためである。照射末期のガス内圧については、基準ケース( $d/2t=8.4$ )では、制限目安値(11.8MPa)を若干上回っているが、肉厚を低減したケースでは  $d/2t$  が大きくなり(0.6 mm :  $d/2t=12.5$ 、0.4 mm :  $d/2t=18.8$ )、 $d/2t$  を考慮したフープ応力が制限となる限り問題とならないことが分かった。

解析ケースのうち、基準ケースは、平成 15 年度検討において炉心高さとして上部ガスプレナム長が概ね同程度になるよう設定した肉厚であるのに対し、肉厚を 0.6 mm まで低減したケースで制限条件を満足するには、炉心高さの約 1.3 倍のガスプレナム長、肉厚を 0.4 mm まで低減したケースでは、炉心高さの約 2.2 倍のガスプレナム長が必要となることが分かった。ただし、今回のサーベイはあくまで定常時を対象とした検討結果であり、金属燃料では被覆管内面温度が 650°C を超えると液相形成による被覆管の減肉が生じることから、仕様検討では「運転時の異常な過渡」を想定した減肉の効果を考慮に入れる必要がある。また、金属燃料の内面腐食式について、現状の評価式は燃焼度のみの関数となっているが、本検討の小型炉心のように低出力密度で 30 年といった長期間炉燃焼させる炉心への適用については、その妥当性に関し留意してお

く必要がある。

次に、参考として、外側領域の燃料を想定し、Zr 重量割合を 6 wt.%とした燃料について同様なサーベイを行い、健全性を満足する燃料仕様への Zr 重量割合の影響を把握することとした。ここで、主要な仕様、線出力・被覆管温度履歴の条件は内側領域と同様とした。

外側領域の燃料に対するサーベイ結果を表 3.4-7、及び、図 3.4-2 に示した。Zr 重量割合の低下に伴い、重金属量が増加することから、線出力を同様とした今回の条件では、燃焼度は低下している(83,800 → 75,000 MWd/t)。燃焼度の低下、及び、燃焼度の低下に伴う内面腐食量も低下により CDF は緩和され、上部ガスプレナム長は内側領域の燃料より短縮する傾向にある結果が示された。ただし、その影響の程度は、Zr 重量割合 10 wt.%から 6 wt.%の範囲では、肉厚 0.4 mm のケースでも 2.5 %程度と僅かであることが認められた。

### 3.4.2 燃料ピン健全性評価

上記サーベイ計算に基づき、設計炉心のガスプレナム長さを設定し、燃料ピン健全性を評価した。ガスプレナム長さの設定に先立ち、設計炉心に比較的近い(1)炉心高さ 95cm、(2)スミア密度 70%、(3)ピン平均燃焼度 130GWd/t の条件で図 3.4-1 を調整した。その結果を図 3.4-3 に示す。本図より設計炉心のピン径 0.78 mm では、ガスプレナム長さは炉心高さの約 1.5 倍となることが分かる。そこで、設計炉心の高さ 101cm を考慮して、ガスプレナム長さを 151.5cm に設定した。

設計炉心について、サーベイ計算と同様に方法で、内側炉心、中間炉心、外側炉心の CDF、照射末期フープ応力、照射末期ガス内圧を評価した。

評価の結果、CDF (制限条件 0.5) は、0.17 (内側炉心)、0.22 (中間炉心)、0.02 (外側炉心) で、照射末期フープ応力 (制限条件 120 MPa (目安値)) は、101 MPa (内側炉心)、102 MPa (中間炉心)、80 MPa (外側炉心) で、照射末期ガス内圧 (制限条件 11.8 MPa (目安値)) は、8.9 MPa (内側炉心)、9.0 MPa (中間炉心)、7.3 MPa (外側炉心) であり、いずれも制限条件を満たし、燃料ピンの健全性を確認できた。

表 3.4-1 サーベイ計算用小型炉心の設定した解析ケースの一覧

解析ケース	燃料ピン径(d) (mm)		被覆管肉厚(t) (mm)	燃料ピン径/肉厚比 (d/2t)
	内径	外径		
基準ケース(肉厚 0.89 mm)	13.22	15.00	0.89	8.4
肉厚 0.8 mm ケース	13.40	15.00	0.80	9.4
肉厚 0.7 mm ケース	13.60	15.00	0.70	10.7
肉厚 0.6 mm ケース	13.80	15.00	0.60	12.5
肉厚 0.5 mm ケース	14.00	15.00	0.50	15.0
肉厚 0.4 mm ケース	14.20	15.00	0.40	18.8

表 3.4-2 サーベイ計算用小型炉心の炉心・燃料仕様および製造公差の設定値

項目	仕様	製造公差
炉心出力	395 MWth	—
燃焼期間	30 年	—
炉心高さ	98.0 cm	—
燃料形態	金属燃料 (U-Pu-Zr 合金)	—
ボンド材	Na	—
Pu 富化度	12.87 wt.%	—
Zr 重量割合	10.0 wt.%	—
燃料ピン外径*	15.0 mm	実証炉の公差を外挿 (8.5±0.03 mm)
燃料ピン内径*	13.22 mm	実証炉の公差を外挿 (7.5±0.025 mm)
被覆管肉厚	パラメータ (0.89~0.40 mm)	—
ワイヤ径	1.00 mm	—
スミア密度*	80 %TD	±2 %TD
ガスプレナム長(上部)	サーベイ結果から評価	—
ガスプレナム容積	サーベイ結果から評価	—
Na 中酸素濃度	0.67 ppm	—

\*：燃料製造公差に関し、統計処理を適用する項目



表 3.4-3 サーベイ計算用小型炉心の最大線出力履歴の設定値

時間	最大線出力 (W/cm)
0 年	141.8
3 年	145.1
6 年	148.4
9 年	151.6
12 年	148.4
15 年	158.2
18 年	154.9
21 年	158.2
24 年	155.7
27 年	153.1
30 年	150.6

表 3.4-4 サーベイ計算用小型炉心の被覆管最高温度履歴の設定値  
(被覆管肉厚中心温度)

時間	被覆管最高温度 (°C)	
	基準条件*1	不確かさ考慮条件*2
0 年	602.3	613.0
3 年	607.1	618.0
6 年	611.8	623.0
9 年	616.6	628.0
12 年	621.3	633.0
15 年	626.1	638.0
18 年	622.3	634.0
21 年	618.5	630.0
24 年	614.7	626.0
27 年	610.9	622.0
30 年	607.1	618.0

\*1: 「基準条件」は、工学的安全係数の乗算項までを考慮した値。

\*2: 「不確かさ考慮条件」は、乗算項+統計項まで考慮した値。

表 3.4-5 サーベイ計算用小型炉心の工学的安全係数（金属燃料炉心）

処理方法	項目	ホットスポットファクタ		
		$\Delta T_{Na}$	$\Delta T_{Film}$	$\Delta T_{Clad}$
乗算項	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心熱出力較正誤差	1.00	1.02	1.02
	流路変形効果	1.03	1.00	1.00
	集合体間流量配分誤差	1.05	1.00	1.00
	原子炉出入口温度誤差	1.02	1.00	1.00
	ワイヤコンタクト効果	1.00	2.00	1.00
統計項	炉内流量配分誤差	1.03	1.00	1.00
	物性値誤差	1.02	1.30	1.03
	各部製造公差	1.04	1.07	1.08
	スラグ偏心効果	1.00	1.04	1.08

表 3.4-6 サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚とガスプレナム長に関するサーベイ結果 (Zr 含有率 10 wt.%)

解析ケース	燃料ピッチ径 (mm)		被覆管肉厚 (mm)	上部ガスプレナム長 (cm)	ピン平均燃焼度 (MWd/t) [統計処理適用]	照射末期ガス内圧 (MPa) [統計処理適用]	被覆管外面腐食量 ( $\mu$ m) [統計処理適用]	被覆管内面腐食量 ( $\mu$ m) [統計処理適用]	照射末期フープ応力 (MPa) [統計処理適用]	CDF(-) [統計処理適用]
	内径	外径								
基準ケース(肉厚0.89)	13.22	15.00	0.89	90.5	83,800	13.1	23.8	82.2	120	0.051
肉厚 0.8 ケース	13.40	15.00	0.80	99.9	83,800	11.5	24.0	82.0	120	0.049
肉厚 0.7 ケース	13.60	15.00	0.70	114.0	83,800	9.7	24.1	81.8	120	0.047
肉厚 0.6 ケース	13.80	15.00	0.60	134.0	83,800	8.0	24.3	81.6	120	0.045
肉厚 0.5 ケース	14.00	15.00	0.50	165.5	83,800	6.3	24.5	81.4	120	0.041
肉厚 0.4 ケース	14.20	15.00	0.40	222.0	83,800	4.5	24.6	81.2	120	0.036

表 3.4-7 サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚とガスプレナム長に関するサーベイ結果 (Zr 含有率 6 wt.%)

解析ケース	燃料ピッチ径 (mm)		被覆管肉厚 (mm)	上部ガスプレナム長 (cm)	ピン平均燃焼度 (MWd/t) [統計処理適用]	照射末期ガス内圧 (MPa) [統計処理適用]	被覆管外面腐食量 ( $\mu$ m) [統計処理適用]	被覆管内面腐食量 ( $\mu$ m) [統計処理適用]	照射末期フープ応力 (MPa) [統計処理適用]	CDF(-) [統計処理適用]
	内径	外径								
基準ケース(肉厚0.89)	13.22	15.00	0.89	90.0	75,000	13.2	23.8	75.2	120	0.050
肉厚 0.8 ケース	13.40	15.00	0.80	99.0	75,000	11.7	24.0	75.0	120	0.050
肉厚 0.7 ケース	13.60	15.00	0.70	112.7	75,000	9.9	24.1	74.8	120	0.048
肉厚 0.6 ケース	13.80	15.00	0.60	132.5	75,000	8.1	24.3	74.7	120	0.044
肉厚 0.5 ケース	14.00	15.00	0.50	162.8	75,000	6.4	24.5	74.5	120	0.042
肉厚 0.4 ケース	14.20	15.00	0.40	216.5	75,000	4.7	24.6	74.3	120	0.037

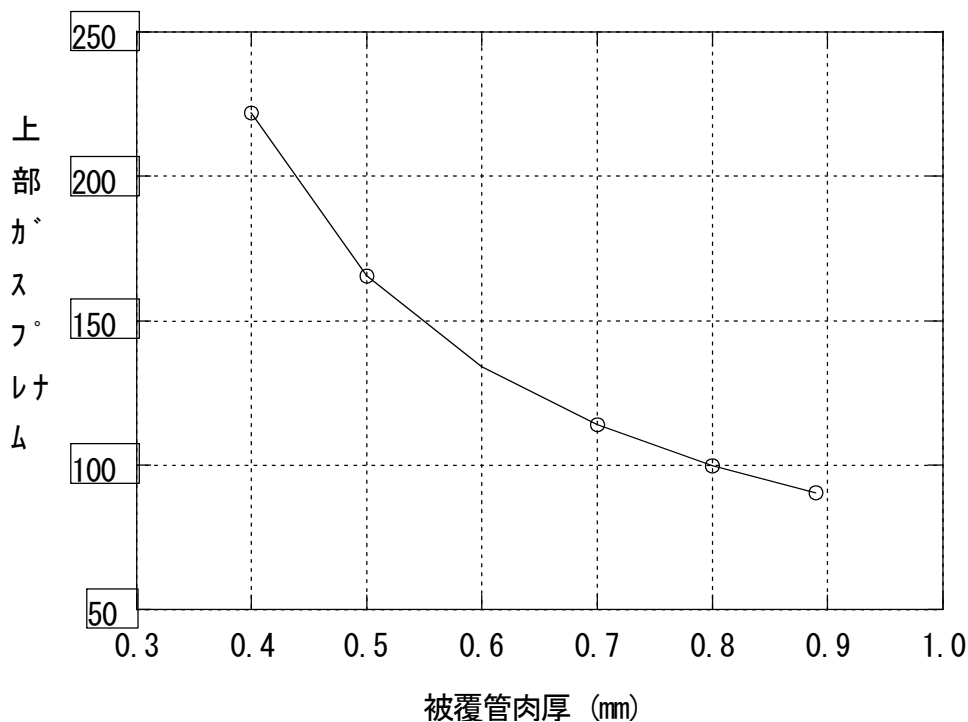


図 3.4-1 サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚と上部ガスプレナム長の関係(Zr 含有率 10 wt.%)

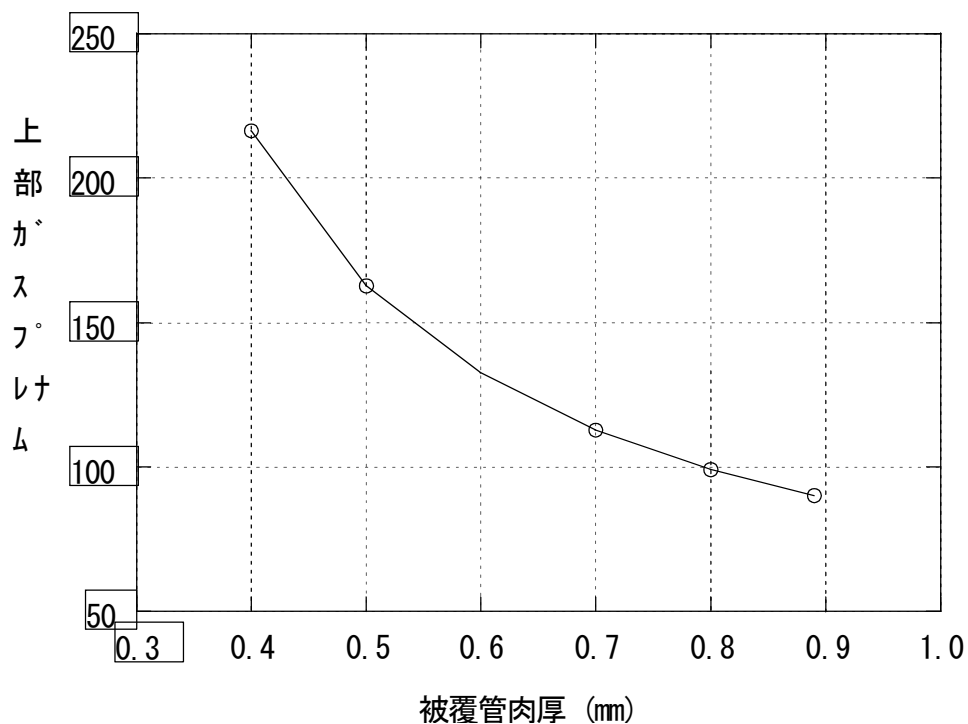


図 3.4-2 サーベイ計算用小型炉心の燃料健全性を満足する被覆管肉厚と上部ガスプレナム長の関係(Zr 含有率 6 wt.%)

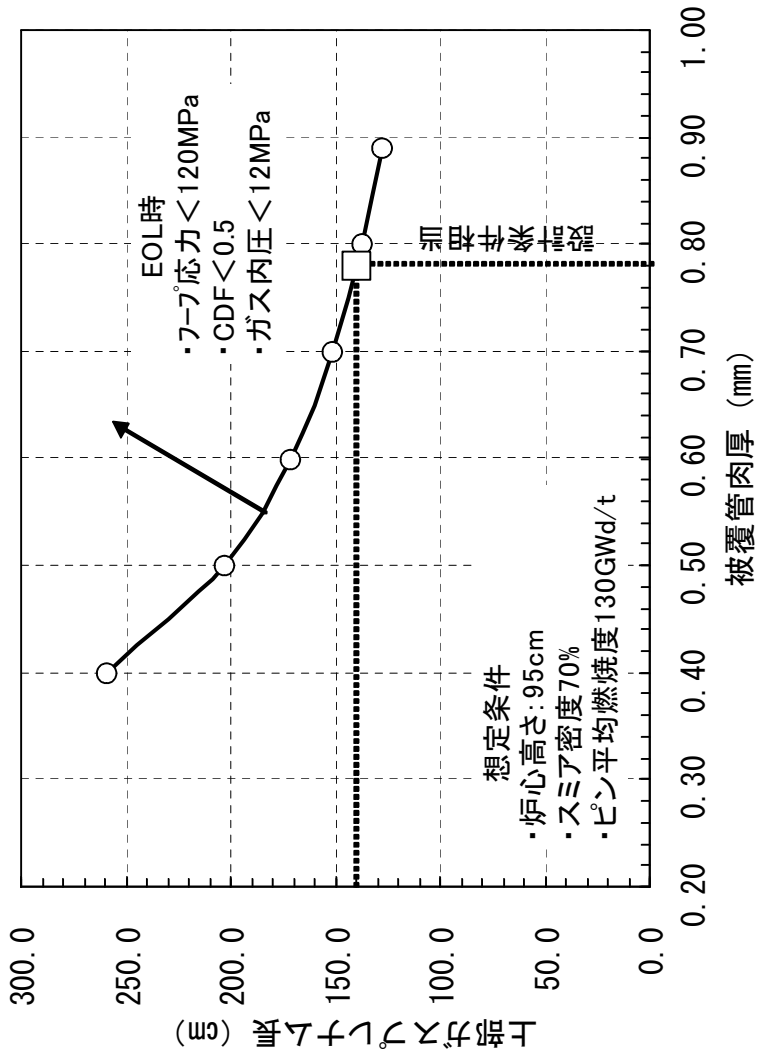


図 3.4-3 50MWe 長寿命追求型小型炉の設計炉心のガスプレナム長の設定に用いた関係図

### 3.5 流量配分計画

炉心核特性解析を通じて得られたサイクル初期(BOC、0年時)、中期(MOC、15年時)、末期(EOC、30年時)での集合体毎の出力変動、炉心出力分布から、被覆管内面温度制限(650℃)を満足する流量配分を設計した。

炉心流量配分設計における設定条件、制約条件を下記に記す。

- ・炉心冷却材出入口温度： 550℃/395℃ ( $\Delta T = 155^\circ\text{C}$ )
- ・1次系冷却材全流量： 612kg/s
- ・流量配分率： 炉心部 96%/制御系・遮へい体・バイパス 4%
- ・ミスマッチファクタ： 1.0 (1バッチ炉心のため)
- ・被覆管内面最高温度： 650℃

各集合体に含まれる燃料ピンの被覆管内面温度を、制限値 650℃以下とするために必要となる集合体流量を、以下の計算式に従い算出した。つまり、各集合体に対する必要流量は、全寿命中の最大出力と径方向出力ピーキング係数の積で求まる熱出力に対し、下式で求められる被覆管内面温度を制限値以下とする冷却材流量として求められた。また、流量配分の成立性は、必要流量の合計値が炉心配分流量以下となるかどうかで判断した。

$$T_{clad} = (\Delta T_{Na} \times F_b \times R.P.F. + \Delta T_0) \times HSF + T_{inlet}$$

ここで、

- $T_{clad}$ ：被覆管内面最高温度 (°C)
- $\Delta T_{Na}$ ：集合体出口位置冷却材平均温度上昇値 (°C)  
(集合体熱出力、配分流量、冷却材平均比熱から導出)
- $F_b$ ：周辺流れ効果係数 (=1.1)
- R. P. F.：集合体内径方向ピーキング係数  
(3D 拡散計算から導出)
- $\Delta T_0$ ：冷却材-被覆管内面温度上昇総相当値 (=10°C)
- HSF：ホットスポットファクター (=1.18)  
(被覆管に対する工学的安全係数合計相当値として定義)
- $T_{inlet}$ ：炉心入口温度 (°C)

本炉心の集合体毎の必要流量と設定した流量区分を図 3.5-1 に示し、炉内集合体番号を図 3.5-2 に示す。必要流量の大きさに応じて流量領域を 5 区分とした。このとき必要流量の総和は 572kg/s となり、612kg/s × 96% = 588kg/s に対し約 3%の余裕を有した。この余剰流量を上記流量区分で再配分する流量配分設計を行った。余剰流量配分後の設計流量を用いて、被覆管内面最高温度(ノミナル値及びホットスポット値)を算出した(図 3.5-1 参照)。いずれの集合体においても、被覆管内面最高温度(ホットスポット)は制限値 650℃以下となっていることが確認できた。

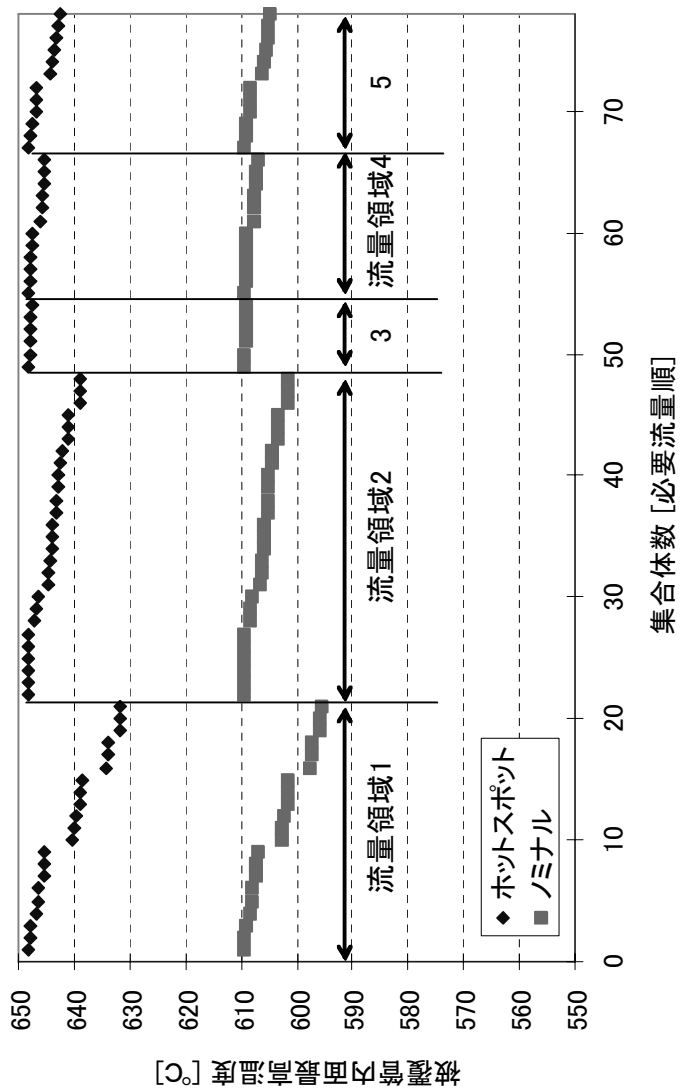


図 3.5-1 50MWe 長寿命追求型小型炉の流量配分計画および被覆管内面最高温度

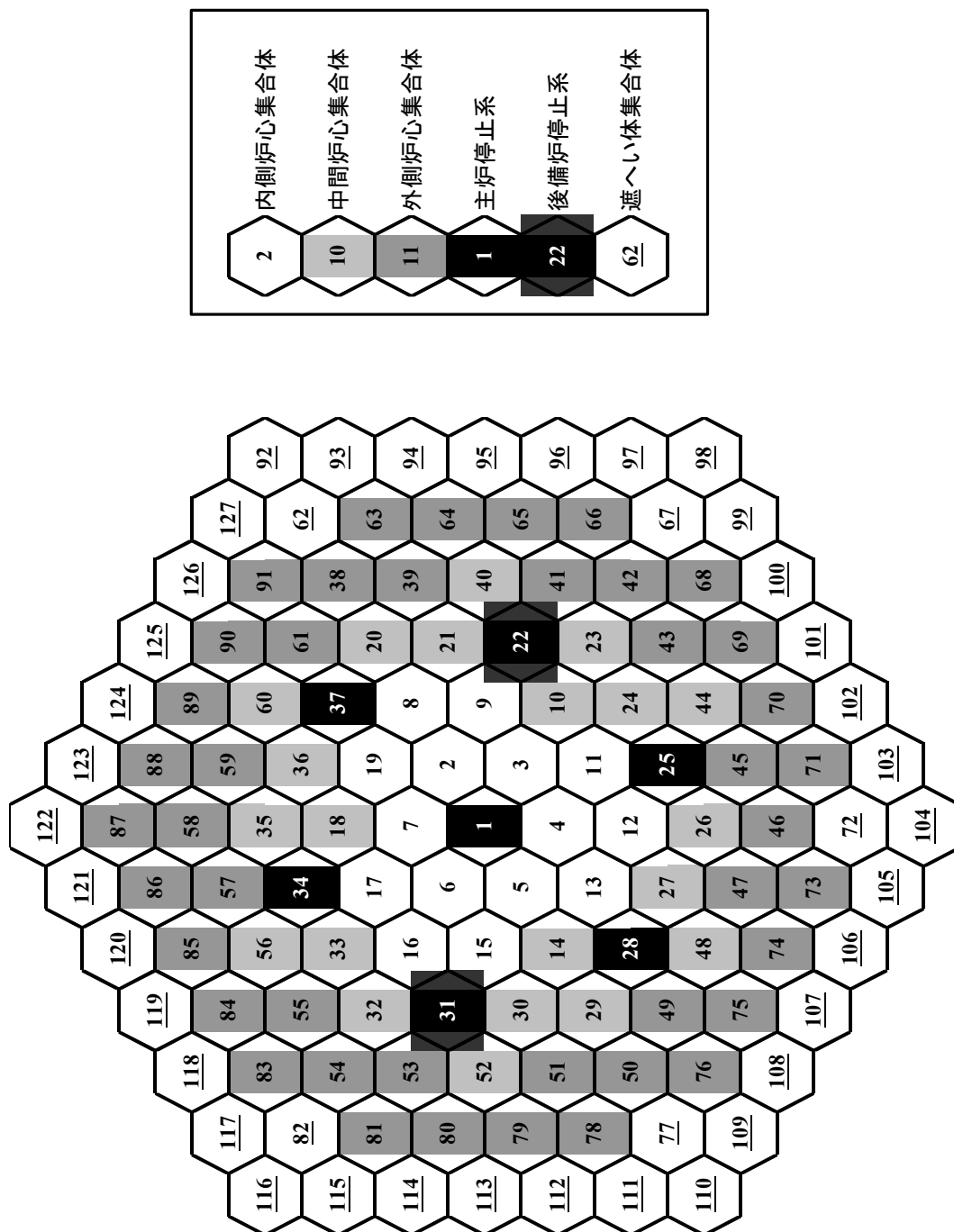


図 3.5-2 50MWe 長寿命追求型小型炉の炉心内集合体番号



### 3.6 遮へい設計

本長寿命追求型小型炉の検討では、30年間連続運転後に炉心燃料を一括して入れ替える燃料無交換特性の追求、低線出力・中燃焼度に応じた燃料・集合体構成合理化による燃料体積比向上、遮へい体構成の合理化などにより、炉心等価直径及び遮へい体外接円径の小径化による炉心コンパクト化を図っている。

一方、プラント概念としては、従来検討してきたタンク型での容積・径削減方策が追求されると同時に、ループ型概念を採用した場合のプラント合理化方策も検討されている。

ループ型概念案を図 3.6-1 に示す。1ループ型で、入口配管を原子炉容器の側面下部に配置し、さらに炉心槽の削除と炉心槽－原子炉容器間のナトリウム層幅を削減する方策が検討されている。この炉心槽削除案は、炉心が小型で、かつ、燃料一括交換のため燃料貯留槽を必要としない特徴を踏まえた方策案である。なお、従来の大型／中型炉概念では、炉心遮へい体の外側に炉心槽、さらにナトリウム層を挟んで原子炉容器が位置している。

炉心径方向の遮へい構成を考えた場合、原子炉容器に対する高速中性子照射量制限を踏まえた炉心槽・ナトリウム層幅の合理化を図っていく必要がある。本検討は、当該炉心領域部を対象に、原子炉容器照射制限を満足する遮へい層数・厚さのサーベイ結果をまとめるものである。

#### 3.6.1 検討条件

##### (1) 計算体系・照射制限

##### (i) 計算体系・条件：

TWOTRAN コードによる 2次元 RZ 輸送 (S8) 計算 (図 3.6-2 参照)

##### (ii) 想定遮蔽体材料：

SUS 遮へい体 (SUS 構造材 70 vol%、冷却用 Na 30 vol%)

ZrH 遮へい体 (Zr-H 体積比 45 vol%、SUS 構造材 26 vol%、冷却用 Na 29 vol%)

##### (iii) 想定遮へい体構成：

- ・ ケース 1 SUS 遮へい体のみによる多層構成
- ・ ケース 2 SUS 遮へい体を内側、Zr-H 遮へい体を外側に、同心円状に同数配置

##### (iv) 炉心燃料部の径方向構成 (図 3 参照)：

炉心中心線からコンクリート構造壁まで、径方向外部に向かい以下の構成をとる。

- ・ 炉心燃料部 (等価直径 182cm)
- ・ 遮へい体：SUS 遮へい体、Zr-H 遮へい体
- ・ ナトリウム層 (遮へい体←→原子炉容器間)
- ・ 原子炉容器 (内直径 280cm、外直径 286cm、肉厚 3cm)
- ・ N<sub>2</sub> 層 (原子炉容器←→ガードベッセル間、窒素充填雰囲気)
- ・ ガードベッセル (内直径 291cm、外直径 296cm、肉厚 2.5cm)
- ・ N<sub>2</sub> 層 (ガードベッセル←→コンクリート構造壁間、窒素雰囲気、幅 50cm)
- ・ コンクリート構造壁 (幅 100cm を想定)

## (2) 照射量評価方法

## (i) フルエンス導出方法：、

定格出力 (50MWe/120MWt) における中性子束を輸送計算により計算して、60 年運転期間中の高速中性子 ( $E \geq 0.1 \text{ MeV}$ ) フルエンスを計算する。

なお、フルエンスの計算値に対して E/C 値補正を施して照射量を評価するが、その時の各種材料の E/C 値補正值を以下に示す。

SUS :	3.2/m	(実証炉設計値相当)
Na :	1.07/m	(実証炉設計値相当)
Zr-H :	4.6/m	(JASPER 実験からの推定値)

E/C 値補正值は、炉心燃料部から原子炉容器内表面にいたる構造物構成に対し、各種材料体積比に応じた実効厚さから材料要素毎の E/C 値を求め、それらの積算により E/C 値の合計値を用いる。

## (3) 原子炉容器照射制限：

ステンレス [SUS304/316FR] 系材料の使用が検討されており、照射量基準 (PNC 高速原型炉第 1 種機器の高温構造設計方針, 1994) は以下となる。

- ・高速中性子照射制限 (BDS/DDS 設定値) :  $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  (550°C)

なお、原子炉容器にフェライト系材料 [Mod. 9Cr] を使用した場合には、その照射量制限目安値は  $4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  である。

## 3.6.2 解析結果

高速中性子照射量評価結果を表 3.6-1、図 3.6-3 にまとめる。表 3.6-1 では、遮へい体層数 (1 層～4 層) を変化させ、遮へい体厚さ (18cm～70cm) に対する高速中性子照射量の変化を示した。合わせて遮へい体外部のナトリウム層幅、原子炉容器内半径も記載している。

SUS 遮へいのみを用いる場合 (ケース 1)、表 3.6-1、図 3.6-3 に示すように、遮へい体厚さ 70cm (遮へい体 4 層相当) とした場合でも照射量は制限 :  $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  を上回る。

なお、原子炉容器にフェライト系材料 [Mod. 9Cr] を使用した場合、SUS 遮へい厚さ (18cm、遮へい体 1 層相当) + ナトリウム層幅 31cm 構成とすることで、その照射量制限目安値 :  $4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  を満足できる見通しである。

SUS と ZrH を併用する場合 (ケース 2)、表 3.6-1、図 3.6-3 に示すように、遮へい厚さ 18cm (SUS 遮へい体 0.5 層相当 + ZrH 遮へい体 0.5 層相当 = 1 層相当) では照射量制限を上回るが、遮へい厚さ 35cm (SUS 遮へい体 1 層 + ZrH 遮へい体 1 層 = 2 層相当) とすることにより制限は満足される。

この構成では遮へい体の外側にナトリウム層 (幅 14cm) が存在している。図 3.6-4 に示す高速中性子照射量の径方向分布によれば、ZrH 遮へい体の直外位置 (半径方向距離 : 127cm) において

制限以下となっている。これは、遮へい厚さ 35cm の SUS1 層 + ZrH1 層相当の構成とすれば、(DRACS 配置及び作動時ナトリウム流路確保との構造取合いに関し、別途プラント設計上考慮する必要はあるものの、) 遮へい上はナトリウム層幅の合理化 (13.8cm 相当→~0cm 相当) と原子炉容器径の削減 (直径 280cm→268cm 程度) が可能なことを意味する。

なお、フェライト系材料[Mod. 9Cr]を用いれば、遮へい厚さ 18cm (SUS0.5 層 + ZrH0.5 層構成) で制限目安値 ( $4 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ) が満足されることから、さらなる合理化 (原子炉容器直径 280cm→231cm 程度) の可能性がある。

本設計の長寿命追求型小型炉では原子炉のコンパクト化のため、遮へい体構成として SUS0.5 層 + ZrH0.5 層を想定している。炉心槽を有する小型炉について、SUS0.5 層 + ZrH0.5 層の遮へい構成で遮へい計算を実施した。本小型炉の高速中性子照射量の径方向分布を図 3.6-5 に示す。炉心槽にフェライト系材料[Mod. 9Cr]を用いた場合には、炉心槽内側境界位置における値は照射制限目安値 ( $4 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ) を下回る見通しである。

### 3.6.3 まとめ

(1) ループ型の長寿命追求型小型炉における炉心槽削除方策に対し、SUS 製原子炉容器での高速中性子照射制限を満足する遮へい体層数・厚さを評価し、以下の結果を得た。

- (i) 遮へい厚さ 35cm 相当 (SUS 遮へい体 1 層、ZrH 遮へい体 1 層) とする構成により、原子炉容器 (直径 280cm) に対する照射制限目安値 ( $4 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ ) は満足される見通しである。
- (ii) ナトリウム流路幅を削除することにより、原子炉容器径を 268cm 程度まで合理化できる可能性がある。
- (iii) 原子炉容器にフェライト系材料[Mod. 9Cr]を用いた場合には、遮へい厚さ 18cm (SUS0.5 層 + ZrH0.5 層構成) で照射制限目安値 ( $4 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ) を下回る見通しである。

(2) 炉心槽を有する小型炉では、炉心槽にフェライト系材料[Mod. 9Cr]を用いた場合には、炉心槽内側境界位置における値は照射制限目安値 ( $4 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ) を下回る見通しである。

表 3.6-1 長寿命追求型小型炉の遮へい層数・厚さと高速中性子照射量  
( $E \geq 0.1\text{MeV}$ 、60年間)

遮蔽体 層数	遮蔽体 厚さ (cm)	遮蔽体-炉容器間 Na層幅 (cm)	遮蔽体 外接円直径 (cm)	原子炉容器 内直径 (cm)	高速中性子照射量 ( $n/cm^2$ ) [ $\geq 0.1\text{MeV}$ , 60yrs]	
					SUS遮蔽体	SUS&ZrH遮蔽体
1	18	31	231	280	$3.6E+22$	$7.4E+21$
2	35	14	268	280	$3.0E+22$	$1.3E+21$
2.5	44	5	286	280	$2.7E+22$	$4.8E+20$
3	52	2	305	291	$1.9E+22$	$1.9E+20$
4	70	2	342	326	$7.1E+21$	$2.0E+19$

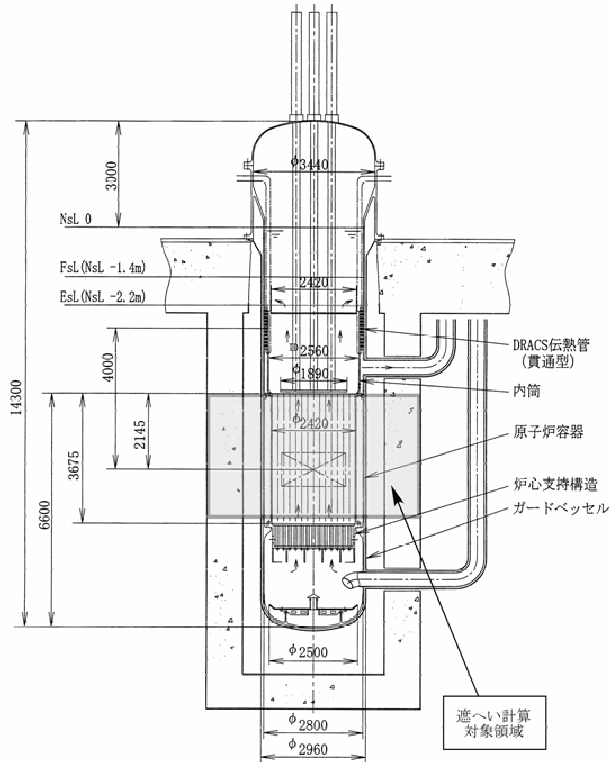


図 3.6-1 長寿命追求型ナトリウム冷却小型炉（ループ型概念）の原子炉容器構成図および遮へい計算体系領域

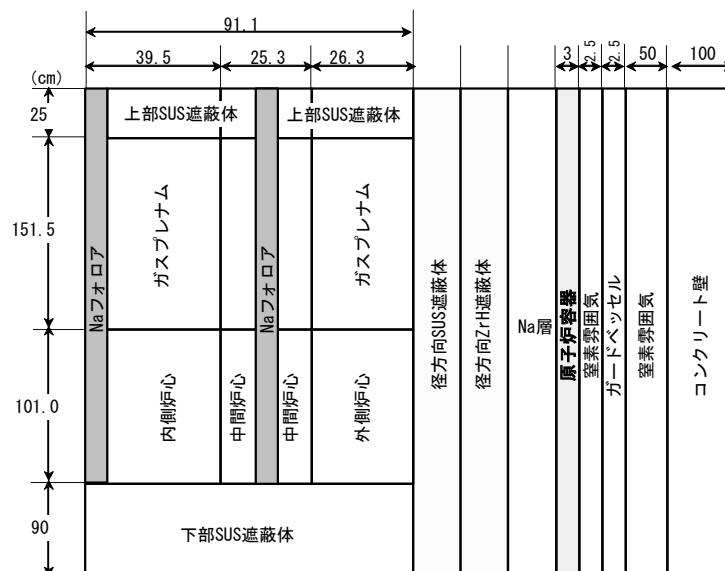


図 3.6-2 長寿命追求型小型炉の遮へい計算用 2次元RD体系図

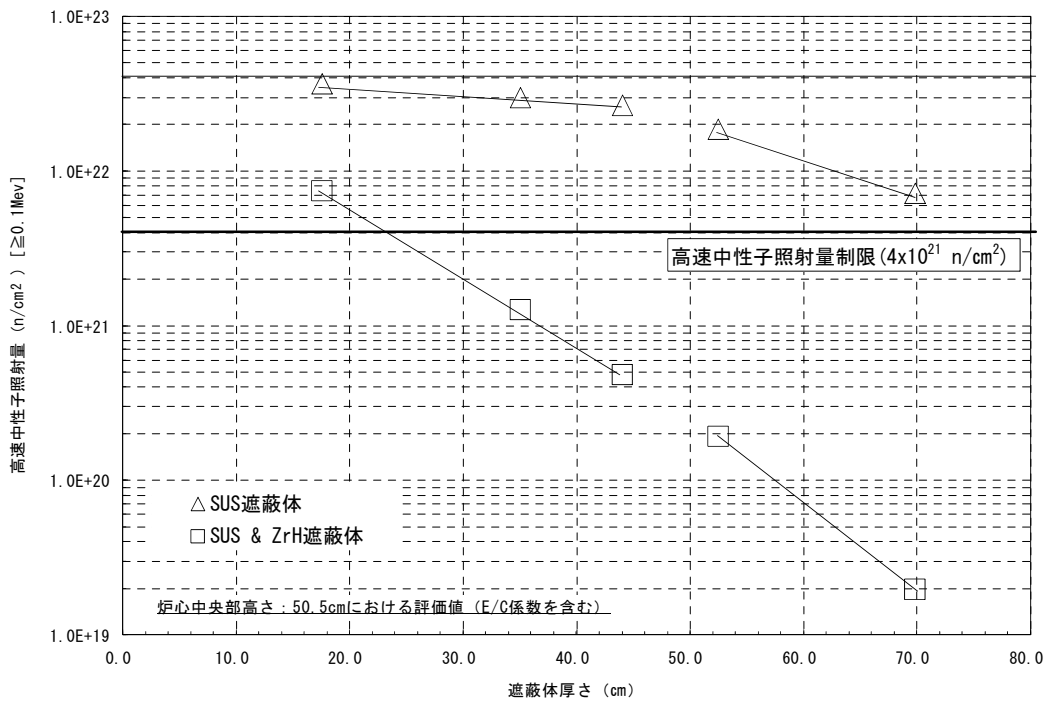


図 3.6-3 長寿命追求型小型炉の遮へい層厚さと高速中性子照射量 ( $E \geq 0.1\text{MeV}$ 、60年間)

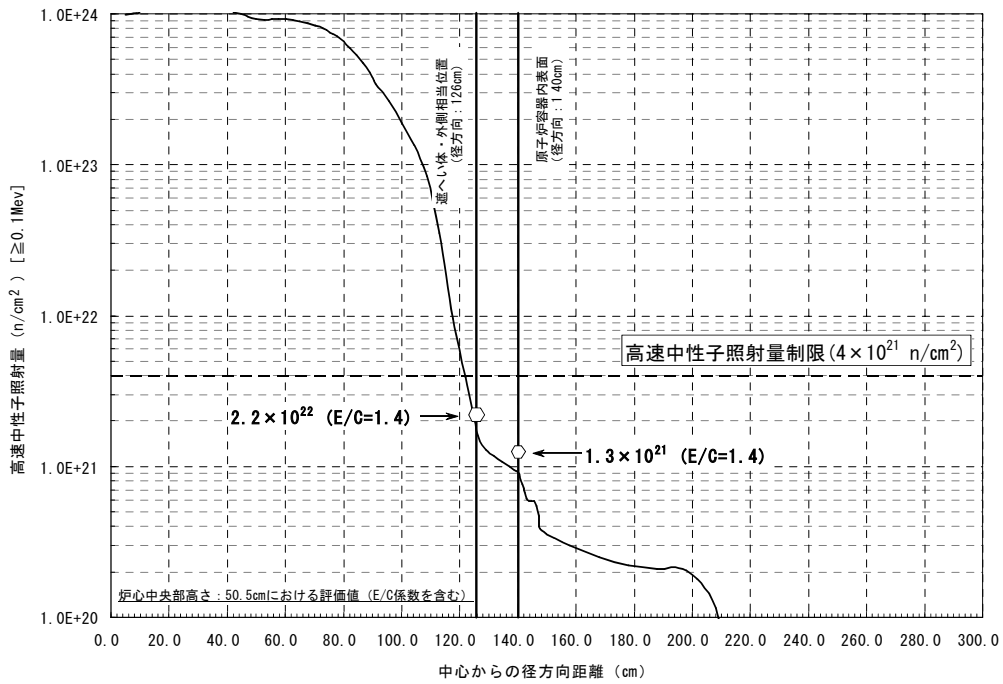
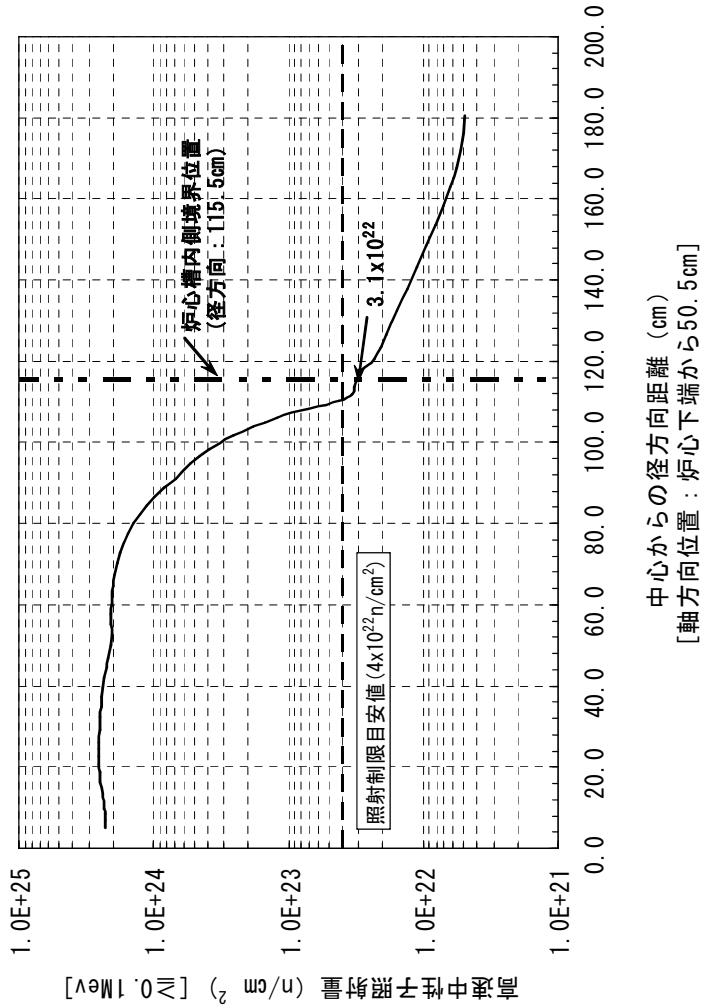
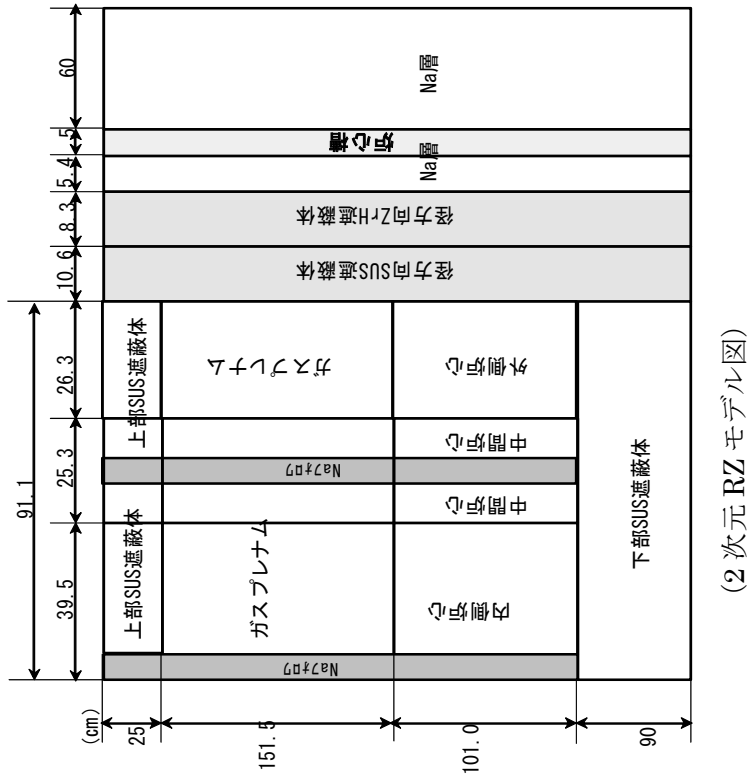


図 3.6-4 長寿命追求型小型炉の「SUS 遮へい体 1 層 + Zr-H 遮へい体 1 層」構成における高速中性子照射量の径方向分布 (炉心中央高さ位置)



[SUS 遮へい体 0.5 層、Zr-H 遮へい体 0.5 層 (炉心槽を有する小型炉) ; 炉心の遮へい計算における E/C 補正係数: 2.2 を想定]

図 3.6-5 50MWe 長寿命追求型小型炉の高速中性子照射量の径方向分布 (炉心中央高さ)

### 3.7 制御棒調整不要な運転期間に関する検討

本長寿命追求型小型炉は、超長期運転サイクル（30年）という特徴を有すると同時に、炉心反応度の時間的変化が大型 MOX 燃料炉心などと比べて小さいという特性を持つ。これらの特性を活かした“炉心制御（制御棒調整）を要せずに長期運転が可能”となる運用概念、すなわち“運転員の介在を要しない”炉心概念を構築できれば、本小型炉の特長・魅力とすることができる。

平成 15 年度においては、出力 165MWe、運転サイクル 20 年の炉心を対象に検討を行い、炉心流量・温度制御方式に応じた“制御棒調整を要しない期間”（すなわち、運転サイクル中の制御棒調整頻度）を評価した<sup>[4]</sup>。本小型炉では“僻地 = 産業先進地域から物理的に離れた環境”では、“炉心制御を要せずに長期運転が可能”という特長をより活かし得ると考えられる。

#### 3.7.1 検討方法

炉心・プラント運転特性評価を厳密に行うには“炉心反応度変化 $\leftrightarrow$ 出力変化 $\leftrightarrow$ 炉心温度変化 $\leftrightarrow$ プラント熱バランス変化”を扱える炉心・プラントフィードバック解析が必要であり、具体的には動特性解析コードを用いた準過渡解析が必要となる。

本検討では、炉心反応度係数及び単一平均セル内熱解析を用いて、“反応度変化 $\leftrightarrow$ 出力変化”を簡易的に求め、“燃焼に伴う炉心反応度の時間的変化”から制御棒調整頻度を推算する手法を用いた。“出力変化 $\leftrightarrow$ プラント熱バランス変化”は、ナトリウム冷却中型炉を対象とした部分負荷運転時のプラント熱バランス評価結果<sup>[6]</sup>を参考に、1 次系炉心入口温度を定めることとした。

本研究では、以下の手順に従って検討した。

##### (1) 100%定格出力時の冷却材・燃料・構造材の炉内平均温度推算

単一セル内の熱解析から、冷却材、燃料、被覆管、ラップ管、炉心支持板の平均温度を推算する。またピーク出力ピンでの被覆管内面最高温度の概算値を、周辺流れ効果相当値、集合体内径方向ピーキング係数、被覆管工学的安全係数相当値などを用いて評価する。

##### (2) 部分負荷運転時の炉心入口温度、熱・電気出力、炉内平均温度推算

部分負荷運転時（定格の 90%及び 80%出力時）の平均温度及びピーク出力ピンの被覆管内面最高温度を推算する。これらの温度は、プラント熱バランス及び原子炉制御方式に大きく依存する。

プラント熱バランスについては、ナトリウム冷却中型炉（炉心出口温度 550℃）を対象とした部分負荷運転時の熱出力、炉心入口温度変化を熱バランスにより求めた既存結果を用いることとした。そこでは、プラント電気出力 30%～100%状態に対し、1 次系流量を炉心出力に比例させる制御形態を想定しており、熱出力 90%時で炉心入口温度 383℃、80%時で 371℃となる。

原子炉制御方式としては、原子炉主制御、又はタービン主制御、炉心出入口温度一定制御、又は可変制御、炉心流量一定制御、又は可変制御などが考えられる。本検討では、平成 15 年度ナトリウム冷却小型炉での検討結果及びナトリウム冷却中型炉の熱バランス評価から、①1 次系流量



を炉心熱出力に比例させる制御（出力比例制御）、②1次系流量に対しても制御を行わず100%定格出力条件で一定とする方式（定格値固定方式）を想定する。

### （3）制御棒調整頻度の推定

上記（1）（2）の検討結果から、出力変動に対する各部位の温度変化が求まる。これらを炉心等温温度係数（表 3.7-1 参照）を用いて炉心反応度変化（相当分）へ変換する。さらに炉心反応度の時間的変化（図 3.7-1 参照）を考慮して、出力変動上の許容幅（例えば、部分負荷 90%–100% 状態に収まるよう運転要件を規定）から制御棒の調整頻度を求める。

図 3.7-1 から分かるように、寿命初期の約 5 年間は、炉心反応度は殆ど変化しない。また反応度増加率が最大となるのは、約 8 年経過時でその変化は 1 年当り  $0.0658 (\% \Delta k/kk')$  である。反応度減少率が最大となるのは、EOL 時の 30 年経過時でその変化は 1 年当り  $-0.1275 (\% \Delta k/kk')$  となる。

本評価では、炉心の週・月単位での反応度及び出力変化を評価することから、炉心支持板温度係数を考慮することとする。これは炉心入口温度の緩やかな変化（1 ヶ月で  $10^{\circ}\text{C}$  程度）に対して炉心支持板温度は十分追従可能で、実質的に大きな反応度変化をもたらす支持板反応度を考慮する必要があるのである。

炉心反応度変化には、燃焼に伴う燃料組成変化による寄与（ $1.11\% \Delta k/kk'$ ）、燃料形状変化（スエリング）による寄与（ $-0.78\% \Delta k/kk'$ ）が有る。炉心制御性に関する実効的な検討を行う観点から、前者に関しては、炉心燃焼計算から求められるノミナル評価値を用いる。後者については、スエリングによる燃料の軸方向伸長と径方向膨張による寄与がある。金属燃料照射実験によれば、ピン燃焼度 2at% までは伸張するもののそれ以降伸びは鈍化し、伸びの最大値は 7% 程度と推定されている。径方向膨張時には、膨張部分でボンドナトリウムが最大 30% 程度取り込まれる、とする報告がある。本検討では、炉心平均燃焼度 2at% まで燃料は軸方向に一様伸張しそれ以降は伸張しないこととし、また径方向膨張についてはボンドナトリウムが一様に 30% 取り込まれる状況を仮定して反応度寄与を求めた。

## 3.7.2 解析及び推算結果

### （1）ケース 0 100% 定格出力時の温度推算

本炉心の平均線出力は  $120\text{W/cm}$  であり、これから平均的冷却材温度、燃料温度を単一セル熱計算で推定する。なお、ラップ管平均温度 $\approx$ 炉内冷却材平均温度、炉心支持板温度 $\approx$ 炉心入口冷却材温度と仮定した。炉心入口温度と出口温度は定格状態で  $395^{\circ}\text{C}$  及び  $550^{\circ}\text{C}$  である。

評価結果を表 3.7-2 のケース 0 にまとめた。平均炉心燃料温度  $528^{\circ}\text{C}$ 、平均構造材温度  $473^{\circ}\text{C}$ 、平均被覆管温度  $479^{\circ}\text{C}$  で、被覆管内面ピーク温度は  $648^{\circ}\text{C}$  である。

### （2）ケース 1 出力比例制御条件での制御棒調整頻度

1 次系流量を炉心熱出力に比例させる制御方式（出力比例制御方式）を用いた場合の炉心温度変化から、反応度変化を求め、その反応度変化に相当する燃焼期間経過を求める。

この時の炉心入口、出口、炉心流量に対する制御は、以下の通りである。

- ・ 入口温度 : プラント熱バランスから決定
- ・ 出口温度 : 入口温度・炉心流量・炉心熱出力から決定
- ・ 炉心流量 : 炉心熱出力と比例

(i) 部分負荷 90%運転を許容する場合の調整頻度

部分負荷 90%時の炉心温度及び反応度変化を求める。解析結果を表 3.7-2 中のケース 1 (90%出力) に示した。電気出力 90%を得るためには熱出力 91.15%が必要であり、この時、炉心入口温度はプラント熱バランスから 385℃となり、炉心流量 91.15% (∝熱出力) から、炉心燃料温度: 513℃ (15℃低下)、構造材・冷却材・ラッパ管温度: 462℃ (11℃低下)、被覆管温度: 468℃ (11℃低下)、支持板温度: 385℃ (10℃低下) となる。これは炉心反応度変化で  $1.43 \times 10^{-2} \% \Delta k/kk'$  に相当する。また炉心出口温度: 540℃ (10℃低下)、被覆管内面ピーク温度: 636℃ (12℃低下) となる。

炉心反応度変化と、図 3.7-1 中の反応度変化率最大値・最小値から、出力減少時 (~30 年時) の制御棒調整間隔 (出力 100%→90%となる時間) は 41 日、出力上昇時 (~8 年時) の制御棒調整間隔 (出力 90%→100%となる時間) は 79 日と評価される。

(ii) 部分負荷 80%運転を許容する場合の調整頻度

部分負荷 80%時も同様に炉心温度及び反応度変化を求める。解析結果を表 3.7-2 のケース 1 (80%出力) に示した。電気出力 80%を得るためには熱出力 82.30%が必要であり、この時、炉心入口温度はプラント熱バランスから 374℃となり、炉心流量 82.30% (∝熱出力) から、炉心燃料温度: 497℃ (31℃低下)、構造材・冷却材・ラッパ管温度: 452℃ (21℃低下)、被覆管温度: 457℃ (22℃低下)、支持板温度: 374℃ (21℃低下) となる。これは炉心反応度変化で  $2.86 \times 10^{-2} \% \Delta k/kk'$  に相当し、炉心出口温度: 529℃ (21℃低下)、被覆管内面ピーク温度: 625℃ (23℃低下) となる。

炉心反応度変化と、図 1 中の反応度変化率最大値・最小値から、出力減少時 (~30 年時) の制御棒調整間隔 (出力 100%→80%となる時間) は 82 日、出力上昇時 (~8 年時) の制御棒調整間隔 (出力 80%→100%となる時間) は 159 日と評価される。

(3) ケース 2 定格値固定方式での制御棒調整頻度

1 次系流量を定格時 100%相当条件で一定値とする方式 (定格値固定方式) を用いた場合の炉心温度変化から反応度変化を求め、それに相当する燃焼期間経過を求める。

この時の炉心入口、出口、炉心流量に対する制御は、以下の通りである。

- ・ 入口温度 : プラント熱バランスから決定 (出力比例制御と同等を仮定)
- ・ 出口温度 : 入口温度・炉心流量・炉心熱出力から決定
- ・ 炉心流量 : 熱出力定格 100%条件での値で一定制御

また、ケース 1 と比較し炉心出口温度が低下することから、熱効率が低下することになる。本解析では、ケース 1 における同部分負荷条件での熱効率に対し 1%低下する条件を仮定した。

## (i) 部分負荷 90%運転を許容する場合の調整頻度

部分負荷 90%時の炉心温度及び反応度変化を求める。解析結果を表 3.7-2 のケース 2 (90%出力) に示した。電気出力 90%時に熱出力 93.38%であり、この時、炉心入口温度はプラント熱バランスから 387°Cとなる。炉心流量 100% (=一定値) から、炉心燃料温度: 511°C (17°C低下)、構造材・冷却材・ラップ管温度: 460°C (13°C低下)、被覆管温度: 466°C (13°C低下)、支持板温度: 387°C (8°C低下) となる。これは炉心反応度変化で  $1.14 \times 10^{-2} \% \Delta k/kk'$  に相当する。また炉心出口温度: 532°C (18°C低下)、被覆管内面ピーク温度: 624°C (24°C低下) となる。

炉心反応度変化と、図 3.7-1 の反応度変化率最大値・最小値から、出力減少時 (~30 年時) の制御棒調整間隔 (出力 100%→90%となる時間) は 33 日、出力上昇時 (~8 年時) の制御棒調整間隔 (出力 90%→100%となる時間) は 63 日と評価される。

## (ii) 部分負荷 80%運転を許容する場合の調整頻度

部分負荷 80%時も同様に炉心温度及び反応度変化を求める。解析結果を表 2 のケース 2 (80%出力) に示した。電気出力 80%を得るためには熱出力 84.38%が必要であり、この時、炉心入口温度はプラント熱バランスから 377°Cとなる。炉心流量 100% (=一定値) から、炉心燃料温度: 489°C (39°C低下)、構造材・冷却材・ラップ管温度: 442°C (31°C低下)、被覆管温度: 447°C (32°C低下)、支持板温度: 377°C (18°C低下) となる。これは炉心反応度変化で  $2.69 \times 10^{-2} \% \Delta k/kk'$  に相当し、炉心出口温度: 507°C (43°C低下)、被覆管内面ピーク温度: 590°C (58°C低下) となる。

炉心反応度変化と、図 3.7-1 の反応度変化率の最大値・最小値から、出力減少時 (~30 年時) の制御棒調整間隔 (出力 100%→80%となる時間) は 77 日、出力上昇時 (~8 年時) の制御棒調整間隔 (出力 80%→100%となる時間) は 149 日と評価される。

## 3.7.3 考察とまとめ

長寿命追求型小型炉心においては、その炉心反応度変化から、運転期間 30 年間中の初期 8 年程度 (炉心平均燃焼度 2Gwd/t) までは、燃料組成変化による反応度増加と、燃料形状変化 (スエリング) による反応度低下が相反する効果を生じ、結果として炉心の反応度変化が抑制される結果が得られた。この結果は平成 15 年度ナトリウム冷却小型炉検討から得られた結論と (反応度変化の値自体に差はあるものの) 定性的には同等のものである。

炉心流量を原子炉熱出力と比例させる制御方式を用いた場合、部分負荷運転 90%を許容する場合には最も頻度の高い条件で 41 日毎、80%を許容する場合で 82 日毎となる結果が得られた。一方、炉心流量を定格 100%条件で固定値とする方式では、90%で 33 日毎、80%で 77 日毎という結果が得られ、出力比例制御と比較し調整間隔が短くなる結果が得られた。

この結果を反応度変化、炉心出入口温度の差異から考えてみる。ケース 1 (90%出力) とケース 2 (90%出力) では、投入反応度が  $1.43 \times 10^{-2} \% \Delta k/kk'$  と  $1.14 \times 10^{-2} \% \Delta k/kk'$  の差があり、表 3.7-2 によれば、これは主として炉心支持板反応度変化からの寄与が大きいと思われる。すなわち、炉心出力 90%時に、流量を 90%から 100%とした場合、炉心出入口でのナトリウム温度上

昇幅が 10%低下することになるが、この時、単に出口温度が低下するだけではなく炉心入口温度の上昇を伴うことになる。これは出口温度低下分の熱効率低下を、(同電気出力条件の下) 熱出力増加 (91%→93%) により補うことが、引いてはプラント熱バランス全体の温度を底上げしたことに因るものである。

炉心流量に対し出力比例制御／定格値固定方式のどちらを用いる場合でも、制御棒調整間隔は最短のものでも 33～41 日 (部分負荷出力 90%以上)、77～82 日 (部分負荷出力 80%以上) と評価され、長寿命追求型小型炉は“炉心制御 (制御棒調整) を要せずに長期運転”する可能性を有すると判断される。

表 3.7-1 長寿命追求型小型炉の等温温度係数

●等温温度係数	[EOEC組成時]	
炉心部燃料ドップラー	$\Delta k/kk' / ^\circ\text{C} \times 10^{-5}$	-0.225
炉心部構造材ドップラー		-0.023
燃料軸方向膨張係数		-0.383
冷却材温度係数 [炉心部+ガスプレナム部]		0.385
冷却材温度係数 [炉心部]		0.454
被覆管温度係数		0.093
ラッパ管温度係数		0.014
炉心支持板温度係数		-0.954

表 3. 7-2 長寿命追求型小型炉の炉心流量制御／固定方式と炉心反応度変化および制御棒調整間隔

ケース#	0 (100%出力)		1 (90%出力)		2 (80%出力)		2 *2 (80%出力)	
	代表温度 [°C]	投入反応度 [%Δk/kk]	代表温度 [°C]	投入反応度 [%Δk/kk]	代表温度 [°C]	投入反応度 [%Δk/kk]	代表温度 [°C]	投入反応度 [%Δk/kk]
炉心・運転 状態	運転状態	定格	部分負荷運転					
	原子炉電気出力	100%	100%⇒90%	100%⇒80%	100%⇒90%	100%⇒80%	100%⇒80%	100%⇒80%
	原子炉熱出力	100%	100%⇒91%	100%⇒82%	100%⇒93%	100%⇒84%	100%⇒84%	100%⇒84%
プラント変 数評価方 法	1次系Na流量	100%	100%⇒91%	100%⇒82%	100%	100%	100%	100%
	炉心入口温度	定格	プラント熱バランス 評価結果を引用					
	炉心出口温度		炉心熱出力・炉心流量・ 炉心入口温度より評価					
炉心流量	定格	出力比例制御						
代表温度・ 反応度変 化	代表温度 [°C]	528	497	452	452	452	452	452
	炉心燃料	3.45E-03	6.89E-03	4.79E-04	1.17E-02	8.01E-03	2.04E-03	3.73E-03
	構造材	2.39E-04	4.79E-04	5.86E-03	1.17E-02	8.01E-03	2.04E-03	2.97E-04
	燃料軸方向膨張	528	497	452	452	452	452	452
	冷却材	473	452	452	452	452	452	452
	被覆管	479	452	452	452	452	452	452
	ラツパ管	473	452	452	452	452	452	452
	炉心支持板	395	374	374	387	387	377	377
	合計		1.43E-02	2.86E-02	1.14E-02	1.14E-02	2.69E-02	2.69E-02
	炉心入口Na温度	395°C	385°C	374°C	387°C	387°C	377°C	377°C
炉心出口Na温度	550°C	540°C	529°C	532°C	532°C	507°C	507°C	
被覆管内面ピーク温度	648°C	636°C	625°C	624°C	624°C	590°C	590°C	
評価結果	制御棒調整間隔*1	41日 79日	82日 159日	33日 63日	77日 149日	77日 149日	77日 149日	77日 149日
	出力減少時 出力上昇時							

\*1：最も短い間隔で制御棒操作が必要となる場合

\*2：ケース1に対して熱効率1%低下を仮定

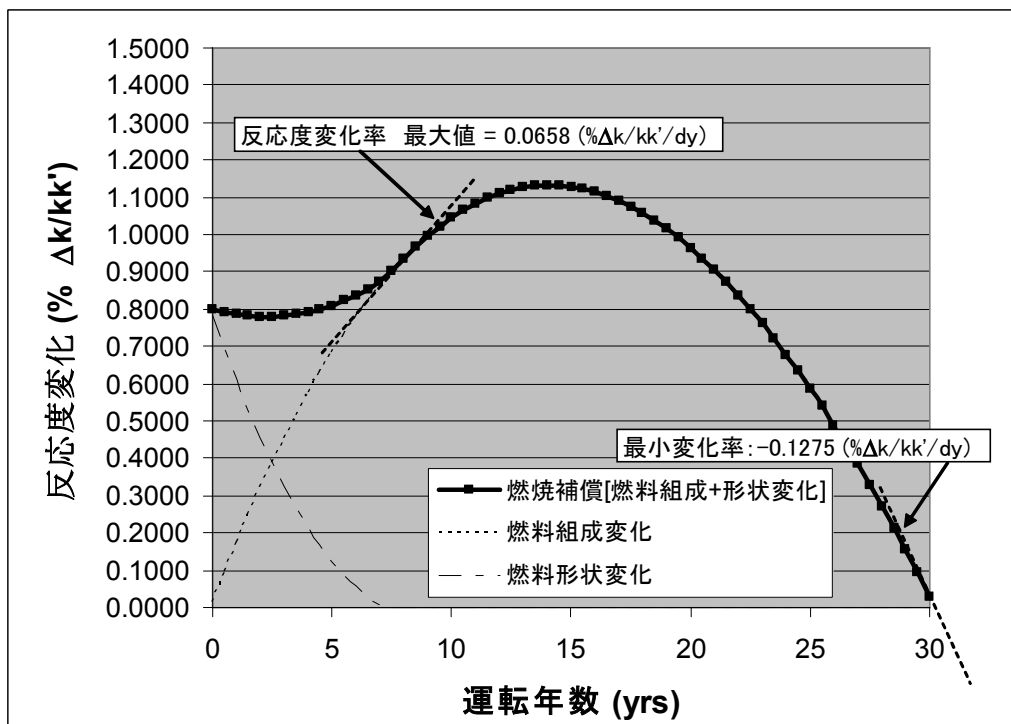


図 3.7-1 長寿命追求型小型炉の小型炉の燃焼反応度変化  
[燃料組成変化および燃料形状変化の寄与]

### 3.8 まとめ

僻地や離島での立地を想定してプラント寿命中燃料無交換を目指す「長寿命追求型概念」について、平成 15 年度と同様に出力分布変動が少なく出口温度高温化のポテンシャルの高い Zr 含有率多領域単一 Pu 富化度の高出口温度対応金属燃料炉心をベースとして炉心・燃料設計を実施した。

電気出力 50MWe の長寿命追求型炉心は、燃料無交換の特徴を活用した仕様（ラップ管薄肉化、ラップ管間ギャップ縮小など）とすると共に今後の開発も見込んだ検討条件を設定して、炉心燃料交換間隔は 30 年で、炉心出口温度 550°C（水素製造の観点）の見通しを得た。その炉心性能は、炉心高さ／等価直径：101cm/182cm、遮へい体外接円径：2.3m 取出平均燃焼度：77GWd/t、燃焼反応度：1.1% $\Delta k/kk'$ 、増殖比：1.07 であり、制御棒反応度収支、燃料健全性、遮へい性能を満たすことを確認した。本設計炉心の炉心高さ／炉心等価直径／遮へい体外接円径は 1.0 m/1.8 m/2.3m であり、平成 12 年度（フェーズ I）の検討の 50MWe 反射体制御強制循環炉心（炉心寿命 30 年）<sup>[1]</sup> の 0.9m/2.4m/5.0m や、平成 14 年度（フェーズ II-2）検討の 50MWe 制御棒制御強制循環炉心（炉心寿命 10 年）<sup>[3]</sup> の 0.7m/2.4m/2.8m に比べてコンパクト化が実現できている。また、燃焼による反応度変化が小さいため、制御棒の微調整を要しない長期運転の可能性についても示した。

なお、安全解析の結果、ATWS 時に受動的炉停止機構（SASS）の作動により炉心・燃料の健全性が確保できる見通しも示されている。



## 4 経済性追求型小型炉

### 4.1 設計条件

経済性追求型小型炉の炉心の設計条件は、平成 16 年度検討の中型及び大型の高出口温度対応金属燃料炉心と同様の設計方針に基づいて、下記の条件とする（表 2.1 参照）。

- ・原子炉出力（電気／熱）：300MWe／714MWt
- ・原子炉出力／入口温度：550℃／395℃
- ・運転サイクル長さ：2 年程度
- ・炉心高さ：100cm 程度以下
- ・燃焼反応度：2%  $\Delta k/kk'$  程度以下
- ・取出平均燃焼度：100 GWd/t 程度
- ・高速中性子照射量： $5 \times 10^{23}n/cm^2$  以下
- ・燃料形態：U-Pu(TRU)-Zr（ボンド材：ナトリウム）  
スミア密度 70～75%、Zr 含有率 6～10wt%
- ・原子炉材料：ODS 鋼、PNC-FMS 鋼
- ・集合体仕様：ラッパ管付、肉厚 5mm  
[ラッパ管間ギャップは DDI 回避の観点から設定(平成 14 年の中型のナトリウム冷却高出口温度対応金属燃料炉心での検討結果)]
- ・スペーサ型式：ワイヤ
- ・燃料ピン間ギャップ：1mm 以上
- ・プルトニウム富化度：全領域同一（1 種類）
- ・燃料ピン径：8.5mm（1 種類）
- ・炉心領域数：2 領域又は 3 領域
- ・核定数：統合炉定数 ADJ2000R
- ・燃料組成：金属燃料多重リサイクル組成  
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$   
=1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1wt%

## 4.2 炉心パラメータサーベイ

平成 12 年度検討の電気出力 300MWe の BREST 型ナトリウム冷却炉心（3 領域均質炉心）の炉心仕様、炉心配置を参照して炉心を設定して、2 次元 RZ-7 群拡散計算（制御棒領域は制御棒チャンネル）によりサーベイ計算を実施した。但し、ラップ管の仕様は、平成 14 年度の中型のナトリウム冷却高出口温度対応金属燃料炉心の検討結果に基づき DDI 回避の観点から設定した。また、径方向遮へい体は SUS 遮へい体 1 層と Zr-H 遮へい体 1 層の合計 2 層で構成し、その遮へい性能については 4.6 節で記載したようにその成立の見通しを得ている。

表 4.2-1 に 3 領域均質炉心のサーベイ計算結果をまとめて示す。ケース 11 が平成 12 年度検討炉心に基づいた初期の設定炉心である。次に、この結果を基にして最大線出力の低減の観点から、内側/中間/外側炉心の Zr 含有率（Zr 重量密度）、スミア密度、集合体数を微調整した。ケース 12 f が 3 領域均質炉心のサーベイ計算結果の中で、最大線出力の低減などの観点から最適な炉心である。

更に、ケース 12 f の 3 領域均質炉心を基にして 2 領域均質炉心のサーベイ計算を実施した。表 4.2-2 が 2 領域炉心のサーベイ計算結果をまとめたものであり、最大線出力の低減などの観点からケース 21 が最適な炉心である。本炉心はケース 12 f（3 領域炉心）より増殖比などの炉心性能がやや劣るが、ほぼ同程度の核特性が得られている。

次に、出口温度高温化の観点から、規格化包絡熱出力（2 次元 RZ モデル）<sup>1</sup>を評価した。表 4.2-3 に原子炉出口温度 550℃達成の見通しがある平成 12 年度小型炉心、平成 15 年度中型炉心と本検討の小型炉心の規格化包絡熱出力を比較して示す。本検討の小型炉心の規格化包絡熱出力は前記両炉心とほぼ同等の値であり、工学的安全係数合理化などにより出口温度 550℃達成の可能性がある。また、炉心領域数、炉心構成の依存性はほとんど無く、最大線出力が最も小さい 2 領域炉心であるケース 21 を経済性追求型小型炉心に選定することにした。なお、図 4.2-2 にケース 12 f（3 領域炉心）とケース 21（2 領域炉心）の径方向出力分布を示す。両炉心とも燃焼による出力分布の変化が小さく、外側炉心の出力勾配はほぼ同等であることが分かる。

上記のサーベイ計算では制御棒領域は制御棒チャンネルを想定したが、ケース 21（2 領域炉心）について制御棒をパーク位置とした場合（ケース 21CR）についても計算した。両者の比較を表 4.2-4 に示すが、ケース 21CR の方が増殖比などの炉心性能がやや劣るが、炉心性能目標を満足する見通しである。

参考として、内側/（中間）/外側炉心の重金属密度の相対比率の観点から、これまで検討された高出口温度対応（BREST 型）ナトリウム冷却炉心の仕様と主要核特性を整理して表 4.2-5 に示す。

<sup>1</sup> 包絡熱出力は流量領域区分を設定することを念頭において、集合体内の燃焼を通じて最大の出力密度を抽出・積算して集合体出力を算出して、それを積算した熱出力ある。この包絡熱出力と通常の熱出力の比を規格化包絡熱出力と定義する。本報の包絡熱出力は、基本的に集合体層毎に同一の燃料領域とするリングモデルにより、燃焼ミスマッチを考慮した出力密度分布を用いて各計算メッシュにおける燃焼を通じた最大の出力密度を抽出し、その最大出力密度を用いて集合体 1 層分の積算出力を求め、これを全炉心分で積算することによって算出する。

一般に、3領域均質炉心の方が出力分布の平坦化に有利であるが、最近の中型・大型の高出口温度対応ナトリウム冷却炉心の検討<sup>[5]</sup>では、核特性の劣化も少なく、ほぼ同等の出口温度高温化が実現できる見通しがある（規格化包絡熱出力が同程度）ので2領域炉心を採用している。平成14年度の中型炉心の3領域均質炉心と2領域均質炉心の比較から、内側炉心と外側炉心の重金属密度の相対比率は3領域均質炉心の方が大きいことが分かる（3領域：1.16、2領域：1.10）。また、その相対比率は、3領域炉心では中型炉心1.16に対して、小型炉心は1.3程度で小型炉心の方が大きい。これは小型炉心の方が径方向出力分布の勾配が大きいいため、外側炉心の重金属密度の相対比率を大きくする必要があるのでと思われる。

今回の検討条件（スミア密度70～75%、Zr含有率6～10wt%）での重金属密度の相対比率の最大値は1.15であり、サーベイ計算の結果では、重金属密度の相対比率（内側/（中間）/外側炉心）は、ケース12f（3領域炉心）では1/1.09/1.15であり、ケース21（2領域炉心）では1/-/1.15である。このため、検討条件が緩和されてこの相対比率がさらに大きく設定できれば、3領域炉心ではもう少し核特性が改善される可能性があるが、2領域炉心では今回の検討条件でも出力分布平坦化の観点でほぼ最適な炉心が得られていると思われる。

表 4.2-1 (1/4) 経済性追求型小型炉の3領域炉心サーベイ計算結果

出力: 714MWth 平衡時乗効増倍率 (keff) 【BOEC/WOEC/EDEC】 最大燃焼反応度 (%Δk/k)【 $\beta$ 】 炉心平均燃焼度 (GWd/t) 最大高速度中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ・s)【平均】 最大高速度中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> ) Pu-Fission (t)【初達荷】 増殖比 【BOEC/WOEC/EDEC/Ave.】 炉心パワートラッキング (kgf/cm <sup>2</sup> ) ※SPECTACLE計算 (×1.25)	CASE-11 Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体			CASE-12 Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体			CASE-12a Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体			CASE-12b Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体		
	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心
平衡初期	1.37	1.28	1.16	1.34	1.15	1.18	1.33	1.34	1.18	1.33	1.33	1.19
平衡中期	231.1	215.8	194.5	226.9	192.4	198.0	224.8	226.5	198.0	223.8	226.1	203.3
平衡末期	229.4	215.2	194.5	225.4	192.0	197.5	224.4	226.0	197.5	223.6	225.6	202.8
Zr重量密度 (wt%)	10.0	10.0	6.0	8.0	6.0	6.0	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0
金属燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.80	15.80	16.89	16.33	16.89	16.89	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89
スミア密度 (%)	70.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0
集合体体数	57	60	126	57	126	126	57	54	132	57	48	138
Pu富化度 (wt%)	12.25	11.97	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94
炉心出力 (MWth)	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714
燃焼期間 (日)	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730
燃焼バッチ数	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
制御棒体数 (体)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)
炉心高さ (cm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ガスプレナム長さ (cm)	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0
燃料ピン本数 (本)	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217
ピン径 (mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
ワイヤー径 (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ピン間ギャップ (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
被覆管肉厚 (mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
ダクト肉厚 (mm)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
集合体間ギャップ (mm)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
集合体ピッチ (mm)	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20
炉心等価直径 (cm)	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263
体積割合 (%)	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60
燃料	31.36	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	31.36	33.60	33.60	31.36	33.60	33.60
ボンドNa	13.44	11.20	11.20	11.20	11.20	11.20	13.44	11.20	11.20	13.44	11.20	11.20
ダクト間ギャップNa	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27
被覆管	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74
ダクト	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98
ワイヤー	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
冷却材Na	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41

\*1: 高速度中性子炉 (HTR)  
(1/2)28/230/210/241/242/46237/46241/245/245/245 =  
0.25/0.25/2/2/4/2/0.6/1.6/0.5/0.4/0.11±FF(0.6/0.6%)  
\*2: (最大高速度中性子束) × サイクル日数 × バッチ数 × 24hr × 3600s

表4.2-1 (2/4) 経湾性追求型小型炉の3領域炉心サーベイ計算結果

	CASE-12c			CASE-12d			CASE-12e			CASE-12f		
	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体
出力: 714MWth	0.99531	0.99560	0.99425	0.99537	0.99584	0.99464	0.99497	0.99558	0.99452	0.99507	0.99557	0.99441
平衡時乗初増倍率 (keff) [BOEC/BOEC-EDEC]	0.137	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121
最大燃焼反応度 (%Δk/k)	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
炉心平均燃焼度 (GWd/t)	2.09E+15	2.08E+15	2.09E+15	2.08E+15	2.08E+15	2.08E+15	2.08E+15	2.08E+15	2.08E+15	2.08E+15	2.08E+15	2.08E+15
最大高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ・s) [平均]	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23	5.29E+23
最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197
Pu-Fissile (t) [初達荷]	1.076/1.064/1.031/1.057	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060	1.079/1.067/1.034/1.060
増殖比 [BOEC/BOEC-EDEC/Ave.]	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413
炉心バンドル仕積 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766
※SPECTACLE計算 (x1.25)												
径方向ビーキング (平衡時最大)	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心
	1.32	1.34	1.24	1.31	1.33	1.29	1.31	1.33	1.31	1.31	1.31	1.31
平衡初期	223.1	225.8	207.9	221.5	225.3	216.9	220.9	225.5	220.7	221.3	221.6	220.9
平衡中期	222.8	225.2	207.3	221.2	224.6	216.2	220.6	224.7	219.9	221.1	220.8	220.2
平衡末期	221.9	224.6	206.8	220.4	224.1	215.6	220.0	224.2	219.4	220.3	220.3	219.5
Zr重量密度 (wt%)	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0
金属燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89
スミア密度 (%)	70.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0
集合体数	57	42	144	57	30	156	57	24	162	57	24	162
Pu富化度 (wt%)	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88
炉心出力 (MWth)	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714	714
燃焼期間 (日)	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730
燃焼サイクル数	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
制御棒体数 (体)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)
炉心高さ (cm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ガスブレード長さ (cm)	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0
燃料ピン本数 (本)	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217	217
ピン径 (mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
ワイヤー径 (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ピン間ギャップ (mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
被覆管肉厚 (mm)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
ダクト肉厚 (mm)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
集合体間ギャップ (mm)	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20
集合体ピッチ (mm)	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263
炉心等価直径 (cm)	31.36	33.60	33.60	31.36	33.60	33.60	31.36	33.60	33.60	31.36	33.60	33.60
体積割合 (%)	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心
燃料	13.44	11.20	11.20	13.44	11.20	11.20	13.44	11.20	11.20	13.44	11.20	11.20
ボンドNa	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27
ダクト間ギャップNa	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74
被覆管	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98
ダクト	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ワイヤー	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41
冷却材Na												
合計	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60

\*1: 高速炉多重リサイクルTRU  
 (Pu238/239/240/241/242/Am241/242/Am243/244/245 =  
 0.268/0.25/0.25/2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.11±FF/0.6/0.6%)  
 \*2: (最大高速中性子束) × サイクル日数 × ハット数 × 3600s

表4.2-1 (3/4) 経済性追求型小型炉の3領域炉心サバーベイ計算結果

出力: 714MWth 【BOEC/MEC/EEC】 平衡燃焼増倍率 (keff) 最大燃焼反応度 (%Δk/kk) 炉心平均燃焼度 (GWd/t) 最大燃焼中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ・s) [平均] 最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> ) Pu-fissile (t) [初達荷] 増殖比 [BOEC/MEC/EEC/Ave.] 炉心バンドル仕積 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 計算値 (×1.25)	CASE-13a Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:237体, C/R:7体			CASE-13b Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:237体, C/R:7体			CASE-13c Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:237体, C/R:7体		
	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心
平衡初期	1.34	1.34	1.13	1.33	1.34	1.16	1.33	1.32	1.33
平衡中期	231.6	231.2	194.2	230.7	230.9	200.1	229.7	230.5	230.1
平衡末期	229.9	230.2	193.9	229.2	229.9	199.7	228.3	229.5	205.1
Zr重量密度 (wt%)	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0
金属燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89
スミア密度 (%)	70.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0
集合体体数	57	60	120	57	54	126	57	48	132
Pu富化度 (wt%)		12.10			12.07			12.05	
炉心出力 (MWth)		714			714			714	
燃焼期間 (日)		730	(24ヶ月)		730	(24ヶ月)		730	(24ヶ月)
燃焼バッチ数		4			4			4	
制御棒体数 (体)		10 (主7, 後3)			10 (主7, 後3)			10 (主7, 後3)	
炉心高さ (cm)		100.0			100.0			100.0	
ガスプレナム長さ (cm)		120.0			120.0			120.0	
燃料ピン本数 (本)		217			217			217	
ピン径 (mm)		8.5			8.5			8.5	
ワイヤー径 (mm)		1.00			1.00			1.00	
ピン間ギャップ (mm)		1.00			1.00			1.00	
被覆管肉厚 (mm)		0.50			0.50			0.50	
ダクト肉厚 (mm)		5.00			5.00			5.00	
集合体間ギャップ (mm)		4.20			4.20			4.20	
集合体ピッチ (mm)		157.20			157.20			157.20	
炉心等価直径 (cm)		259			259			259	
体積割合 (%)		内側炉心 31.36 中間炉心 33.60 外側炉心 33.60			内側炉心 31.36 中間炉心 33.60 外側炉心 33.60			内側炉心 31.36 中間炉心 33.60 外側炉心 33.60	
燃料		13.44	11.20	13.44	11.20	11.20	13.44	11.20	13.44
ボントNa		5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27
ダクト間ギャップNa		12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74
被覆管		11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98
ダクト		0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ワイヤー		24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41
冷却材Na									
合計		111.20	111.20	111.20	111.20	111.20	111.20	111.20	111.20

\*1: 高速炉多重リサイクル炉  
(1/2)238/240/241/242/He237/He241/242/245 =  
0.25/0.25/2/2/4/2.0/4/1.6/0.5/0.4/0.11±FF(0.6/0.6%)  
\*2: (最大高速中性子束) × サイクル日数 × バッチ数 × 3600s

表4.2-1 (4/4) 経済性追求小型炉の3領域炉心サーベイ計算結果

出力: 714MWth	CASE-13a			CASE-13b			CASE-14		
	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:237体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:237体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:231体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:237体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:237体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:231体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:231体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:231体, C/R:7体	Zr密度3領域炉心(H=100cm, D=259cm) 燃料集合体:231体, C/R:7体
平衡時乗効増倍率 (keff) [BOEC/WOEC/EOEC]	0.99716	0.99680	0.99444	0.99626	0.99617	0.99439	0.99839	0.99720	0.99448
最大燃焼反応度 (%Δk/k)	0.275			0.188			0.393		
炉心平均燃焼度 (GW/t)	82			81			84		
最大高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ・s) [平均]	2.15E+15			2.15E+15			2.20E+15		
最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	5.41E+23			5.41E+23			5.55E+23		
Pu-Fission (t) [初燃荷]	2.167			2.157			2.133		
増殖比 [BOEC/WOEC/EOEC/Ave.]	1.063/1.052/1.021/1.045			1.071/1.059/1.027/1.052			1.055/1.044/1.014/1.038		
炉心バンドル仕積 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.479			1.479			1.549		
※SPECTACLE計算	1.848			1.848			1.936		
径方向ピーキング (平衡期最大)									
平衡初期	1.33	1.31	1.23	1.32	1.36	1.22	1.33	1.33	1.18
平衡中期	229.7	227.2	211.3	229.0	235.1	209.9	236.2	235.2	208.1
平衡末期	229.7	226.9	210.7	228.8	234.7	209.4	236.3	235.1	207.6
Zr重量密度 (wt%)	228.3	226.3	210.7	227.6	233.8	209.1	234.7	234.5	207.9
金属燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0	10.0	8.0	6.0
スミア密度 (%)	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89	15.80	16.33	16.89
集合体体数	70.0	74.0	75.0	70.0	75.0	75.0	70.0	75.0	75.0
Pu富化度 (wt%)	57	42	138	51	48	138	57	48	126
炉心出力 (MWth)	714			714			714		
燃焼期間 (日)	730		(24ヶ月)	730		(24ヶ月)	730		(24ヶ月)
燃交ハッチ数	4			4			4		
制御棒体数 (体)	10 (主7, 後3)			10 (主7, 後3)			10 (主7, 後3)		
炉心高さ (cm)	100.0			100.0			100.0		
ガスプレナム長さ (cm)	120.0			120.0			120.0		
燃料ピン本数 (本)	217			217			217		
ピン径 (mm)	8.5			8.5			8.5		
ワイヤー径 (mm)	1.00			1.00			1.00		
ピン間ギャップ (mm)	1.00			1.00			1.00		
被覆管肉厚 (mm)	0.50			0.50			0.50		
ダクト肉厚 (mm)	5.00			5.00			5.00		
集合体間ギャップ (mm)	4.20			4.20			4.20		
集合体ピッチ (mm)	157.20			157.20			157.20		
炉心等価直径 (cm)	259			259			256		
体積割合 (%)	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 33.15 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 33.60 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60	内側炉心: 31.36 中間炉心: 33.60 外側炉心: 33.60
燃料	13.44	11.65	11.20	13.44	11.20	11.20	13.44	11.20	11.20
ボンドNa	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27
ダクト間ギャップNa	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74	12.74
被覆管	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98	11.98
ダクト	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ワイヤー	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41	24.41
冷却材Na									
合計	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

\*1: 高速炉多重炉心サーベイ  
 (1)238/239/240/241/242/46287/46288/46289/46290/46291/46292/46293/46294/245 =  
 (0.238/0.239/0.240/0.241/0.242/0.46287/0.46288/0.46289/0.46290/0.46291/0.46292/0.46293/0.46294/245) × サイクル日数 × ハッチ数 × 24hr × 3600s

\*2: (最大高速中性子束) × サイクル日数 × ハッチ数 × 24hr × 3600s

表4.2-2 経済性追求小型炉の2領域炉心サーベイ計算結果

出力: 714MWh	CASE-21			CASE-21a			CASE-21b		
	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体
平衡増殖率 (keff) [BOEC/EOEC]	0.99667	0.99631	0.99444	0.99620	0.99618	0.99460	0.99547	0.99576	0.99443
最大燃焼反応度 (%Δk/kk')	0.22	80		0.16	80		0.14	79	
炉心平均燃焼度 (Gld/t)	2.09E+15	2.09E+15		2.08E+15	2.08E+15		2.11E+15	2.11E+15	
最大高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ・s) [平均]	5.27E+23	5.27E+23		5.24E+23	5.24E+23		5.31E+23	5.31E+23	
Pu-fissile (t) [初燃期]	2.21	2.21		2.203	2.203		2.195	2.195	
増殖比 [BOEC/EOEC/Ave.]	1.065/1.054/1.024/1.048	1.413		1.071/1.060/1.028/1.053	1.413		1.076/1.065/1.032/1.058	1.413	
炉心バンドル圧損 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.413	1.766		1.413	1.766		1.413	1.766	
※SPECTACLE計算	(×1.25)								
径方向ベキング (平衡期最大)	1.33	1.32		1.32	1.34		1.34	1.34	
最大線出力 (W/cm)	223.5	221.3		221.9	226.6		226.4	226.2	
平衡初期	223.6	220.9		221.9	226.2		226.2	225.5	
平衡中期	222.5	220.5		221.0	225.5		225.2	225.0	
平衡末期	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心
Zr重量密度 (wt%)	10.0	6.0		10.0	6.0		9.6	6.0	
金属燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.80	16.89		15.80	16.89		15.90	16.89	
スミア密度 (%)	70.0	75.0		70.0	75.0		70.0	75.0	
集合体数	81	162		75	168		75	168	
Pu富化度 (wt%)	12.04	714		11.95	714		11.87	714	
炉心出力 (MWh)	730	730	(24ヶ月)	730	730	(24ヶ月)	730	730	(24ヶ月)
燃焼期間 (日)	4	4		4	4		4	4	
燃交バッチ数	10 (主7, 後3)	100.0		10 (主7, 後3)	100.0		10 (主7, 後3)	100.0	
制御棒体数 (体)	120.0	217		120.0	217		120.0	217	
炉心高さ (cm)	8.5	8.5		8.5	8.5		8.5	8.5	
ガスレナム長さ (cm)	1.00	1.00		1.00	1.00		1.00	1.00	
燃料ピン本数 (本)	1.00	0.50		1.00	0.50		1.00	0.50	
ピン径 (mm)	5.00	5.00		5.00	5.00		5.00	5.00	
ピン間ギャップ (mm)	4.20	4.20		4.20	4.20		4.20	4.20	
被覆管肉厚 (mm)	157.20	157.20		157.20	157.20		157.20	157.20	
ダクト肉厚 (mm)	263	263		263	263		263	263	
集合体間ギャップ (mm)									
集合体ピッチ (mm)									
炉心等価直径 (cm)									
体積割合 (%)	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心
燃料	31.36	33.60		31.36	33.60		31.36	33.60	
ボントNa	13.44	11.20		13.44	11.20		13.44	11.20	
ダクト間ギャップNa	5.27	5.27		5.27	5.27		5.27	5.27	
被覆管	12.74	12.74		12.74	12.74		12.74	12.74	
ダクト	11.98	11.98		11.98	11.98		11.98	11.98	
ワイヤー	0.80	0.80		0.80	0.80		0.80	0.80	
冷却材Na	24.41	24.41		24.41	24.41		24.41	24.41	
各領域体積割合									

\*1: 高速炉多重リサイクルTRU (Pu238/239/240/241/242/No237/Am241/243/Cm244/245 = 1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1)+FP(0.6%<sup>10</sup>)  
 \*2: (最大高速中性子束) × サイクル日数 × バッチ数 × 24hr × 3600s



表4.2-3 高出口温度対応(BREST型)ナトリウム冷却炉心の規格化包絡熱出力の比較

	H12小型炉	H15中型炉	本検討小型炉(サーベイ計算)			
			CASE-12f	CASE-21	CASE-11	CASE-21c
原子炉熱出力(MWt)	700	1785	714	←	←	←
原子炉電気出力(MWe)	300	750	300	←	←	←
炉心高さ(cm)	110	100	←	←	←	←
炉心等価直径(cm)	270	372	263	←	←	←
炉心領域数	3	2	3	2	3	2
集合体数 (内側/中間/外側)	58/60/126	159/-/234	57/24/162	81/-/162	57/42/144	99/-/144
スペーサ形式	グリッド	ワイヤ	←	←	←	←
燃料ピン径(mm) (内側/中間/外側)	10.5/11.1/12.0	8.5(一定)	←	←	←	←
規格化包絡熱出力	1.07	1.06	1.07	←	←	←
原子炉出口温度(°C)	550°C達成見通し	工安係数合理化により550°C達成見通し	工安係数合理化等により550°C達成の可能性あり (炉心領域数の依存性小)			

表4.2-4 経済性追求小型炉の制御棒挿入効果（パーク位置）

出力：714MWth		CASE-21		CASE-21CR		※C/R パーク位置装荷 (Na-str/B4C[B10:30%]=43/26/31%)	
平衡時実効増倍率 (keff) [BOEC/MOEC/EOEC]		Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体		Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体		Zr密度2領域炉心(H=100cm, D=263cm) 燃料集合体:243体, C/R:7体	
最大燃焼反応度 (%Δk/kk')	0.99667	0.99631	0.99444	0.99897	0.99732	0.46	0.99439
炉心平均燃焼度 (GWd/t)	80	80	80	80	80	80	80
最大高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ・s) [平均]	2.09E+15	2.09E+15	2.09E+15	2.09E+15	2.09E+15	2.09E+15	2.09E+15
最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	5.27E+23	5.27E+23	5.27E+23	5.27E+23	5.27E+23	5.27E+23	5.27E+23
Pu-fissile (t) [初装荷]	2.211	2.211	2.211	2.211	2.211	2.264	2.264
増殖比 [BOEC/MOEC/EOEC/Ave.]	1.065/1.054/1.024/1.048	1.065/1.054/1.024/1.048	1.065/1.054/1.024/1.048	1.045/1.035/1.009/1.030	1.045/1.035/1.009/1.030	1.413	1.413
炉心バンドル圧損 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413	1.413
※SPECTACLE計算	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766	1.766
径方向ビーキング (平衡期最大)	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心
平衡初期	1.33	—	1.32	1.29	—	1.32	1.32
平衡中期	223.5	—	221.3	221.9	—	225.5	225.5
平衡末期	223.6	—	220.9	222.4	—	225.3	225.3
※ミスリ考慮	222.5	—	220.5	221.4	—	225.3	225.3
Zr重量密度 (wt%)	10.0	—	6.0	10.0	—	6.0	6.0
金属燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.80	—	16.89	15.80	—	16.89	16.89
スミア密度 (%)	70.0	—	75.0	70.0	—	75.0	75.0
集合体数	81	—	162	81	—	162	162
Pu富化度 (wt%)	12.04	12.04	12.04	12.33	12.33	12.33	12.33
炉心出力 (MWth)	714	714	714	714	714	714	714
燃焼期間 (日)	730	730	730	730	730	730	(24ヶ月)
燃交バッチ数	4	4	4	4	4	4	4
制御棒体数 (体)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)	10 (主7, 後3)
炉心高さ (cm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ガスブレナム長さ (cm)	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0
燃料ピン本数 (本)	217	217	217	217	217	217	217
ピン径 (mm)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
ワイヤー径 (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ピン間ギャップ (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
被覆管肉厚 (mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
ダクト肉厚 (mm)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
集合体間ギャップ (mm)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
集合体ピッチ (mm)	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20	157.20
炉心等価直径 (cm)	263	263	263	263	263	263	263
体積割合 (%)	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心	中間炉心	外側炉心	内側炉心
燃料	31.36	—	33.60	31.36	—	33.60	31.36
ボンドNa	13.44	—	11.20	13.44	—	11.20	13.44
ダクト間ギャップNa	5.27	—	5.27	5.27	—	5.27	5.27
被覆管	12.74	—	12.74	12.74	—	12.74	12.74
ダクト	11.98	—	11.98	11.98	—	11.98	11.98
ワイヤー	0.80	—	0.80	0.80	—	0.80	0.80
冷却材Na	24.41	—	24.41	24.41	—	24.41	24.41

\*1: 高速炉多重リサイクルTRU  
(Pu238/239/240/241/242/Am241/243/Cm244/245 =  
1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1)+FP(0.6Vol%)  
\*2: (最大高速中性子束) × サイクル日数 × バッチ数 × 24hr × 3600s

表4.2-5 高出口温度対応(BREST型)ナトリウム冷却炉心の検討例の炉心仕様と主要特性の比較

検討炉心 (炉心領域数)	H12小型 (3領域)	H13中型 (3領域)	H14中型(1) (3領域)	H14中型(2) (2領域)	H15中型 (2領域)	H15大型 (2領域)	H15小型 (3領域)	H16長寿命追 求型(2領域)
原子炉熱出力	MWt	1190	1785	1785	1785	3570	395	120
原子炉電気出力	MWe	500	750	750	750	1500	165	50
炉心高さ	m	1.00	0.95	0.95	1.00	1.00	1.27	1.01
炉心等価直径	m	2.84	3.75	3.75	3.72	5.00	2.93	1.82
炉心型式	—	単一Pu富化度 ピン径3領域	単一Pu富化度 ピン径3領域	単一Pu富化度 ピン径2領域	単一Pu富化度 Zr2領域	単一Pu富化度 Zr2領域	単一Pu富化度 Zr3領域	単一Pu富化度 スリ/Zr3領域
サイクル長	y	1.33	2	2	2.25	1.93	20	30
バッチ数	バッチ	6	変則バッチ	3	3	3	1	1
取出平均燃焼度	GWd/t	72	120	88	93.9	94.1	77	77
燃焼反応度	%k/k'	0.04	0.77	0.5	0.52	0.42	1.2	1.11
内部転換比	—	1.06	1.00	1.03	1.03	1.03	1.06	1.07
最大高速中性子照射量	10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>	4.4	5.2	5.1	5.3	5.0	4.9	5.3
炉心平均出力密度	W/cm <sup>3</sup>	110	188	176	164	182	46	46
燃料ピン径 (内側/中間/外側)	mm	10.5/11.1 /12.0	9.2/9.7 /10.3	7.9/8.1 /8.5	8.0/- /8.5	8.5 (一定)	15.0 (一定)	15.0 (一定)
Pu富化度 (内側/中間/外側)	wt%	13.3 (一定)	14.3 (一定)	12.2 (一定)	12.2 (一定)	12.4 (一定)	13.3 (一定)	12.1 (一定)
Zr含有率 (内側/中間/外側)	wt%	10.0 (一定)	10.0 (一定)	10.0 (一定)	16.0/- /10.0	16.0/- /10.0	18.2/14.3 /10.0	10.0/10.0 /6.0
スミア密度 (内側/中間/外側)	wt%	75.0 (一定)	75.0 (一定)	75.0 (一定)	75.0 (一定)	75.0 (一定)	75.0 (一定)	70.0/79.0 /85.0
重金属密度対比 (内側/中間/外側)	—	1/1.12 /1.31	1/1.11 /1.25	1/1.05 /1.16	1/- /1.10	1/- /1.10	1/1.12 /1.25	1/1.13 /1.27

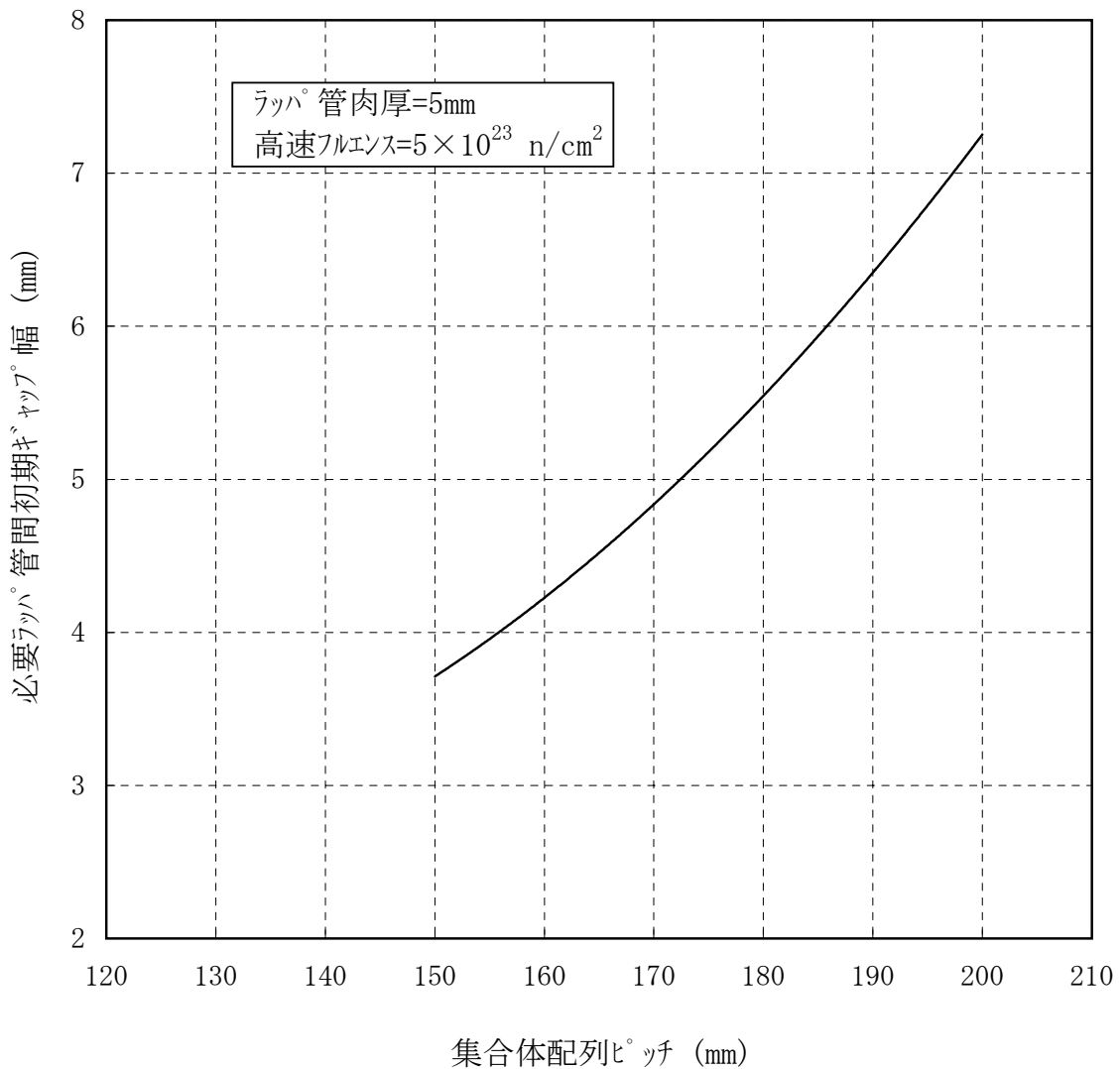


図4.2-1 DDI回避のための集合体配列ピッチと必要ラッパ管間初期ギャップの関係  
(H14年度 中型のNa冷却高出口温度対応金属燃料炉心での検討結果)

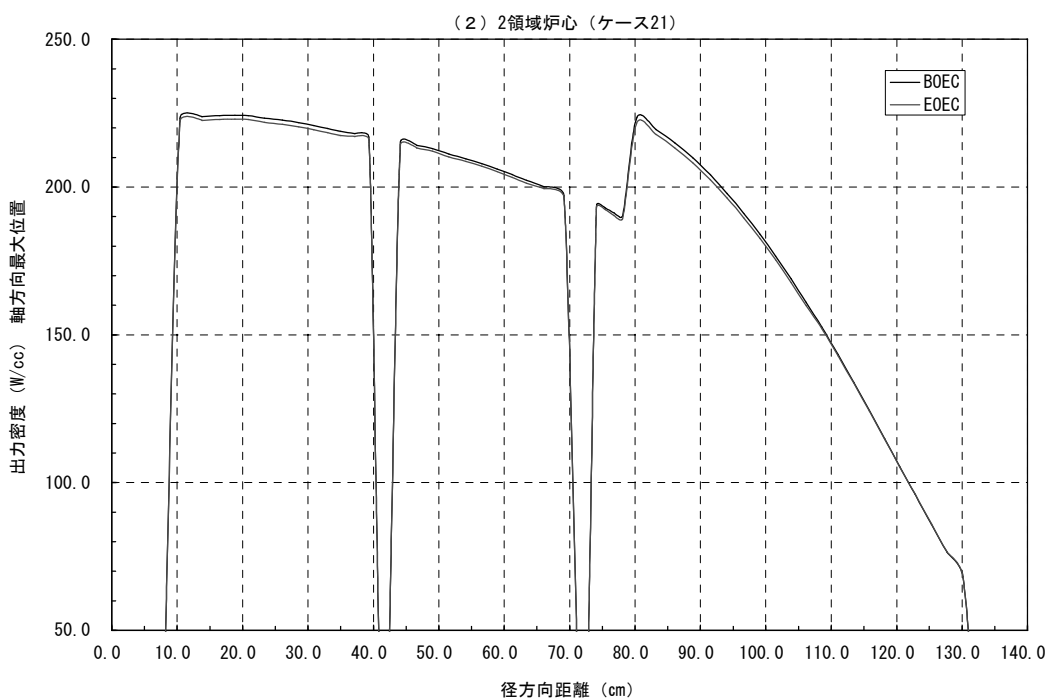
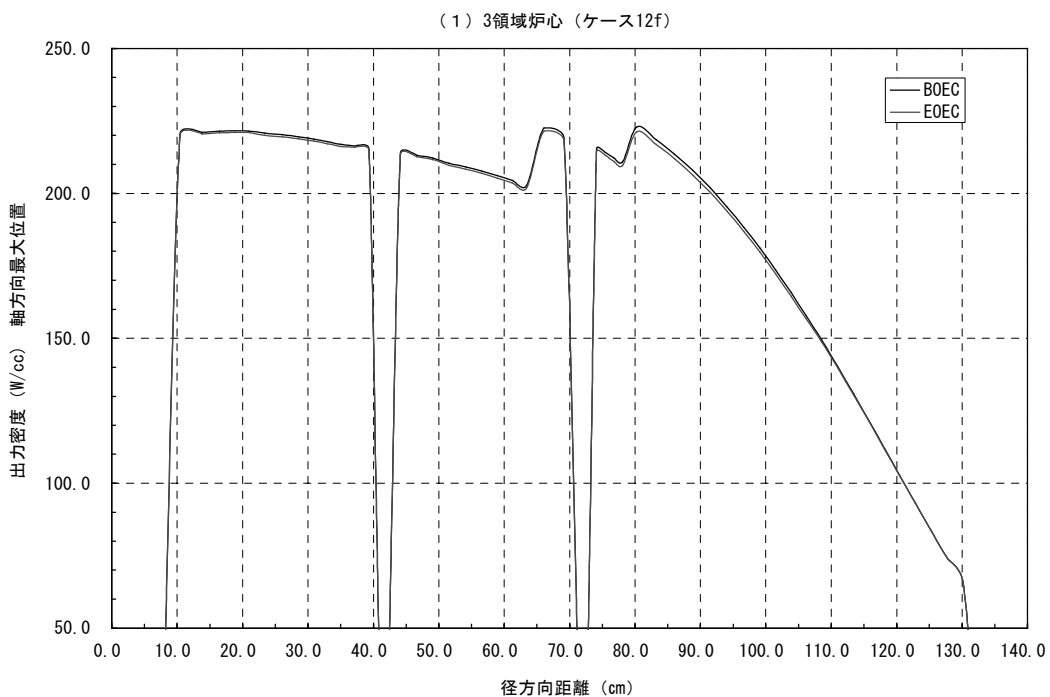


図 4.2-2 経済性追求型小型炉の 3 領域炉心 (ケース 12f) と 2 領域炉心 (ケース 12f) の径方向出力分布の比較

### 4.3 炉心核特性

前記のサーベイ計算に基づいて選定した2領域炉心の炉心配置図を図4.3-1に示し、2次元RZモデル図を図4.3-2に示す。燃料集合体243体、制御棒10体、SUS遮へい体1層、ZrH遮へい体1層であり、遮へい体外接円径は336.2cmである。

炉心燃料集合体概略構成図を図4.3-3に示す。軸方向遮へい体、ハンドリングヘッド、エントランスノズルの長さは、平成15年度の大型のナトリウム冷却MOX燃料コンパクト型炉心の寸法を参照した。上部ガスプレナム長さは、被覆管のCDF、フープ応力の評価より設定した平成15年度の中型の高出口温度対応型金属燃料炉心（最大フルエンスは本小型炉心と同程度）の検討結果を参照して、炉心高さ(100cm)の1.7倍を設定した。なお、炉心計算では暫定的に120cm(炉心高さの1.2倍)を設定している(図4.3-2)。

選定炉心の炉心仕様と核特性結果をまとめて表4.3-1に示す。主な解析結果は、24ヶ月×4バッチ、増殖比1.03、燃焼反応度 $0.46\% \Delta k/kk'$ 、取出平均燃焼度80GWd/t、最大フルエンス $5.2 \times 10^{23}n/cm^2$ であり、設計目標を満足している。表4.3-2に中型及び大型の高出口温度対応金属燃料炉心及び平成12年度のBREST型中型炉の炉心仕様と炉心特性を比較して示す。本設計炉心の装荷時と取出し時の物量収支を表4.3-3に示す。また、制御棒反応度収支は、表4.3-4に示すように成立することを確認した。

本研究では、核特性の評価のみ実施したが、中型及び大型の高出口温度対応金属燃料炉心と同様の核特性が得られ、規格化包絡熱出力の比較から出口温度550℃達成の可能性があることが示された。但し、小型炉では中型炉に比べて規格化包絡熱出力が1%程度大きいので、出口温度550℃達成のためには工学的安全係数合理化なども含む詳細な検討が今後必要である。

表4.3-1 経済性追求型小型炉選定炉心の主な核特性評価結果

運転サイクル長さ (ヶ月)		24.0	
運転サイクル日数 (day)		730.0	
交換バッチ数		4	
炉心熱出力 (MWt)		714	
炉心高さ (cm)		100.0	
ガスプレナム高さ (cm) *1		120.0	
炉心燃料集集体数【内側/外側/合計】		81 / 162	243
径方向遮へい体数【SUS/ZrH】		60 /	66
制御棒体数【主炉系/後備系】		7 /	3
炉心等価直径 (cm)		263	
集集体配列ピッチ (mm)		157.2	
ラッパ管肉厚 (mm)		5.0	
集集体間ギャップ (mm)		4.2	
燃料集集体ピン本数		217	
ピン外径 (mm)		8.50	
被覆管肉厚 (mm)		0.50	
燃料ピン間ギャップ (mm)		1.00	
Zr重量密度 (wt%) 【内側/外側】		10.0 /	6.0
金属燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> ) 【内側/外側】		15.80 /	16.89
スミア密度 (%) 【内側/外側】		70.0 /	75.0
燃料組成 *2		金属燃料多重リサイクルTRU+随伴FP	
計算時使用核定数		ADJ2000R	
燃料集集体積割合 (%) ( )内は実効体積比	燃料体積比	44.80	( 31.36)
	構造材体積比	25.52	
	冷却材体積比	29.68	
Pu富化度 (wt%)		12.33	
初装荷Puf量 (t)		2.264	
取出平均燃焼度 (GWD/t)		80	
平衡時実効増倍率 (keff) 【BOEC/EOEC】		0.998971 /	0.994393
燃焼反応度 (%Δk/kk')		0.46	
増殖比 (-) 【炉心/軸ブロー/合計】	BOEC		1.045
	MOEC		1.035
	EOEC		1.009
	平均		1.030
最大線出力 (W/cm) ※ミスマッチファクター考慮	BOEC	内側	221.9
		外側	225.5
	MOEC	内側	222.4
		外側	225.3
	EOEC	内側	221.4
		外側	225.3
径方向ピーキング (平衡期最大) 【内側/外側】		1.29 /	1.32
最大高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ・s; 平均)		2.063E+15	
最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> ) *3		5.205E+23	
炉心バンドル圧損 (kgf/cm <sup>2</sup> ) ※SPECTACLE計算	計算値	1.413	
	(×1.25)	1.766	
実効遅発中性子割合 (β <sub>eff</sub> )		3.62E-03	
ボイド反応度 *4	炉心部	Δk/kk'	1.98E-02
		炉心+ガスブレ	1.66E-02
	炉心部	\$	5.46
		炉心+ガスブレ	4.58
炉心部燃料ドブラー [T(dk/kk')/dT] *5		-3.99E-03	

\*1: 炉心計算では炉心高さの1.2倍を暫定 (図4.3-3の集集体構成図ではH15年度の中型炉の検討例を参照して1.7倍を設定)

\*2: 金属燃料炉多重リサイクルTRU

(Pu238/239/240/242/Np237/Am241/243/Cm244/245 = 1.1/66.0/25.2/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1) + FP (0.6Vol%)

\*3: (最大高速中性子束) × サイクル日数 × バッチ数 × 24hr × 3600s

\*4: ラッパ管内側のみボイド化、EOEC組成時EOEC組成時70群拡散直接計算結果、非均質効果補正 (0.96)

\*5: 基準+500°C、非均質効果補正 (1.05)

表4.3-2 経済性追求型小型炉の炉心仕様及び炉心特性の比較

	経済性追求型小型炉心 (本設計)	高出口温度対応金属燃料中型及び大型炉心 (H15年度設計)	BREST中型炉(参考) (H12年度設計)
原子炉出力	300MWe/714MWt	750MWe/1785MWt	300MWe級/700MWt
原子炉出口温度	550°C	550°C	540°C
炉心型式*	均質2領域炉心	均質2領域炉心	均質3領域炉心
運転サイクル長さ	24ヶ月	27ヶ月	16ヶ月
燃料交換バッチ数	4	3	6
燃料ピン径	8.5mm	8.5mm	10.5/11.1/12.0mm
集合体配列ピッチ	157.2mm	175.0mm	162.2mm
炉心高さ	100cm	100cm	110cm
遮へい体層数	2(SS1,Zr-H1)	4(SS2,B <sub>4</sub> C2)	2(SS仮設定)
炉心等価直径	2.63m	3.72m	2.7m
遮へい体外接円径	3.36m	5.24m	3.4m
重金属重量	26t	47.0t	28.4t
取出平均燃焼度	80GWd/t	93.8GWd/t	72GWd/t
燃焼反応度	0.46%Δk/kk'	0.48%Δk/kk'	0.04%Δk/kk'
増殖比	1.03	1.03	1.06
最大高速中性子照射量	5.2 × 10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>	5.4 × 10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>	4.4 × 10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>

\* 単一Pu富化度で径方向に燃料重量を変えて、出力分布の空間的・時間的変化を小さくして高出口温度を実現した概念  
H12炉心:ピン径が領域毎3種類、H15炉心:単一ピン径、金属燃料のZr含有率(下限10wt%)が領域毎2種類  
経済性追求型小型炉心:単一ピン径、金属燃料のZr含有率(下限6wt%)が領域毎3種類



表4.3-3 経済性追求型小型炉の装荷時と取出し時の物量収支

装荷燃料、1バッチ当たりの燃料重量 [kg]				取出燃料、1バッチ当たりの燃料重量 [kg]			
ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計
U235	5.03	12.03	17.06	U235	1.57	6.13	7.70
U236	0.00	0.00	0.00	U236	0.62	1.11	1.73
U238	1671.55	3999.01	5670.56	U238	1442.52	3668.64	5111.16
U合計	1676.58	4011.04	5687.62	U合計	1444.71	3675.88	5120.59
Pu238	2.68	6.42	9.10	Pu238	2.90	6.90	9.80
Pu239	160.97	385.11	546.08	Pu239	164.43	389.61	554.04
Pu240	61.46	147.04	208.50	Pu240	66.92	151.79	218.71
Pu241	5.85	14.01	19.86	Pu241	8.18	15.90	24.08
Pu242	5.85	14.01	19.86	Pu242	5.47	13.07	18.54
Pu合計	236.81	566.59	803.40	Pu合計	247.90	577.27	825.17
Np237	0.97	2.33	3.30	Np237	1.18	2.84	4.02
Np239	0.00	0.00	0.00	Np239	0.21	0.31	0.52
Np合計	0.97	2.33	3.30	Np合計	1.39	3.15	4.54
Am241	3.90	9.34	13.24	Am241	3.43	10.03	13.46
Am242m	0.00	0.00	0.00	Am242m	0.24	0.51	0.75
Am243	1.22	2.93	4.15	Am243	1.39	3.17	4.56
Am合計	5.12	12.27	17.39	Am合計	5.06	13.71	18.77
Cm242	0.00	0.00	0.00	Cm242	0.16	0.27	0.43
Cm243	0.00	0.00	0.00	Cm243	0.02	0.02	0.04
Cm244	0.97	2.33	3.30	Cm244	1.29	2.74	4.03
Cm245	0.24	0.58	0.82	Cm245	0.24	0.54	0.78
Cm合計	1.21	2.91	4.12	Cm合計	1.71	3.57	5.28
合計	1920.69	4595.14	6515.83	合計	1700.77	4273.58	5974.35
ラン化FP	0.00	0.00	0.00	ラン化FP	219.57	321.79	541.36
随伴FP	5.71	13.66	19.37	随伴FP	5.71	13.66	19.37
FP合計	5.71	13.66	19.37	FP合計	225.28	335.45	560.73

平衡初期(BOEC)の燃料重量 [kg]				平衡末期(EOEC)の燃料重量 [kg]			
ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計
U235	13.65	37.89	51.54	U235	10.19	31.99	42.18
U236	1.26	2.01	3.27	U236	1.88	3.12	5.00
U238	6331.01	15491.17	21822.18	U238	6101.98	15160.80	21262.78
U合計	6345.92	15531.07	21876.99	U合計	6114.05	15195.91	21309.96
Pu238	10.96	26.05	37.01	Pu238	11.18	26.53	37.71
Pu239	659.38	1556.07	2215.45	Pu239	662.84	1560.57	2223.41
Pu240	254.90	595.77	850.67	Pu240	260.36	600.52	860.88
Pu241	27.90	59.51	87.41	Pu241	30.23	61.40	91.63
Pu242	22.66	54.48	77.14	Pu242	22.28	53.54	75.82
Pu合計	975.80	2291.88	3267.68	Pu合計	986.89	2302.56	3289.45
Np237	4.28	10.20	14.48	Np237	4.49	10.71	15.20
Np239	0.69	0.97	1.66	Np239	0.90	1.28	2.18
Np合計	4.97	11.17	16.14	Np合計	5.39	11.99	17.38
Am241	14.50	38.24	52.74	Am241	14.03	38.93	52.96
Am242m	0.53	0.92	1.45	Am242m	0.77	1.43	2.20
Am243	5.20	12.12	17.32	Am243	5.37	12.36	17.73
Am合計	20.23	51.28	71.51	Am合計	20.17	52.72	72.89
Cm242	0.51	0.78	1.29	Cm242	0.67	1.05	1.72
Cm243	0.03	0.04	0.07	Cm243	0.05	0.06	0.11
Cm244	4.39	9.94	14.33	Cm244	4.71	10.35	15.06
Cm245	0.94	2.23	3.17	Cm245	0.94	2.19	3.13
Cm合計	5.87	12.99	18.86	Cm合計	6.37	13.65	20.02
合計	7352.79	17898.39	25251.18	合計	7132.87	17576.83	24709.70
ラン化FP	329.26	482.36	811.62	ラン化FP	548.83	804.15	1352.98
随伴FP	22.83	54.62	77.45	随伴FP	22.83	54.62	77.45
FP合計	352.09	536.98	889.07	FP合計	571.66	858.77	1430.43

表4.3-4 経済性追求型小型炉の制御反応度収支(平衡炉心)

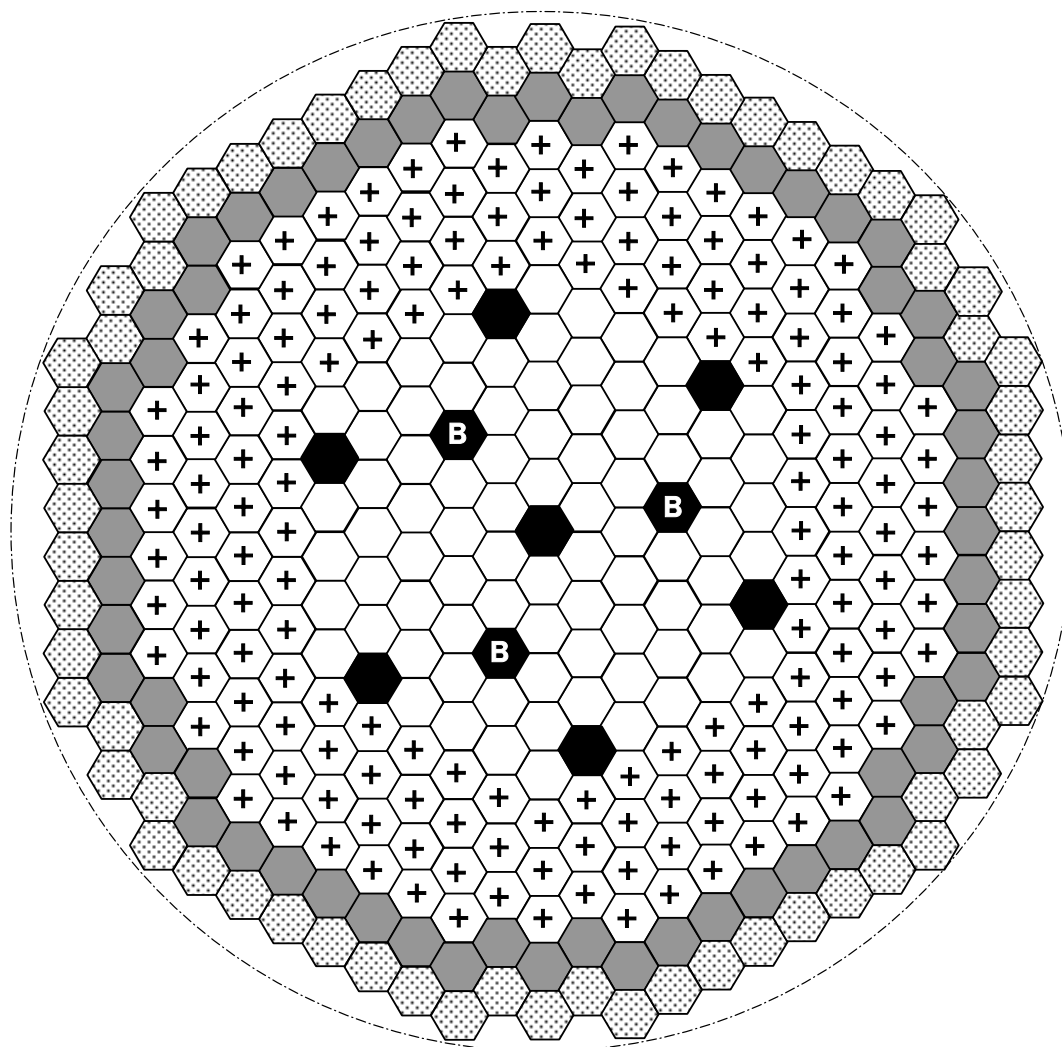
[単位:% $\Delta k/kk'$ ]







項 目	主炉停止系 (1ロット・スタック)	後備炉停止系	
		1ロット・スタック	全数挿入
(1) 計画余剰反応度	1.7	0.3	0.4
a. 出力補償 <sup>*1</sup>	(0.4)	(0.3)	(0.4)
b. 燃焼補償 <sup>*2</sup>	(0.8)	—	—
c. 運転余裕	(0.2)	—	—
d. スエリングによる影響 <sup>*3</sup>	(0.3)	—	—
(2) 余剰反応度の不確かさ(2 $\sigma$ )	0.5	0.06	0.1
a. 臨界性予測誤差	(0)	—	—
b. 出力補償予測誤差	—	(0.06)	(0.08)
c. 燃料製作公差	(0.39)	—	—
d. 燃料交換余裕	(0.20)	—	—
(3) 事故時投入反応度	—	0.1	0.1
(4) 必要制御反応度 [(1)+(2)+(3)]	2.2	0.5	0.6
(5) 制御棒価値	3.5	1.2	1.9
(6) 反応度停止余裕 [(5)-(4)]	1.3	0.7	1.3

\*<sup>1</sup> 炉心領域温度600°Cから180°C(低温停止)、300°C(温態待機)に変化した場合のドップラ反応度に膨張反応度0.1% $\Delta k/kk'$ を見込んだ値

\*<sup>2</sup> 燃焼反応度の不確かさとして0.3% $\Delta k/kk'$ を考慮

\*<sup>3</sup> 軸方向伸び7%時(インベントリ保存)の反応度変化1.36% $\Delta k/kk'$ に4バッチであることを考慮



	内側炉心燃料集合体	81 体
	外側炉心燃料集合体	162 体
	SUS 遮へい体	60 体
	ZrH 遮へい体	66 体
	主炉停止制御棒	7 体
	後備炉停止制御棒	3 体

集合体ピッチ：15.72 cm

炉心等価直径：263 cm

炉心高さ：100.0 cm

外接円径：336.2 cm

図 4.3-1 経済性追求型小型炉選定炉心の炉心配置図

340.0	B4C 遮へい体		B4C 遮へい体		B4C 遮へい体		B4C 遮へい体		B4C 遮へい体		146.0	160.7
300.0	ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム*		ガスプレナム		ガスプレナム		131.3	
180.0	内側炉心		内側炉心		内側炉心		内側炉心		外側炉心		SUS 遮へい体	ZrH 遮へい体
80.0	SUS 遮へい体		SUS 遮へい体		SUS 遮へい体		SUS 遮へい体		SUS 遮へい体			
0.0	ナトリウムフロー		ナトリウムフロー		ナトリウムフロー		ナトリウムフロー		ナトリウムフロー		78.7	146.0
	8.3	40.4	42.8	70.6	73.5	78.7	131.3	146.0	160.7			
	径方向位置 (cm)											

図 4.3-2 経済性追求型小型炉選定炉心の 2 次元 RZ 体系図  
 \*炉心計算では炉心高さの 1.2 倍を暫定 (図 4.3-3 の集合体構成図では H15 年度の中型炉の検討例を参照して 1.7 倍を設定)

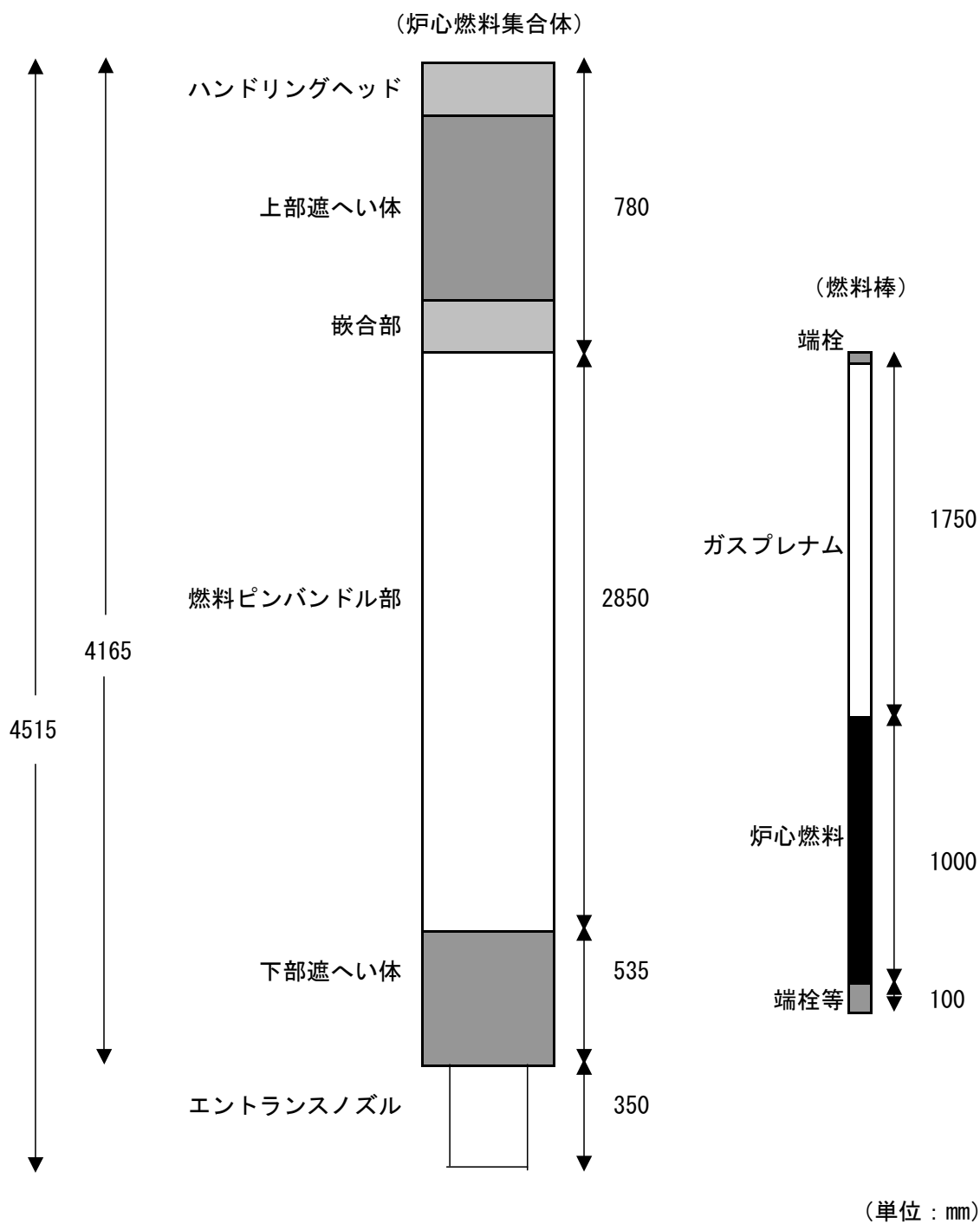


図4.3-3 経済性追求型小型炉選定炉心の炉心燃料集合体概略構成図  
 (ガスプレナム長さはH15年度の中型の高出口温度対応金属燃料炉心の検討例と同等に設定し、その他はH15年度の大型のNa冷却MOX燃料コンパクト型炉心の検討例と同等に設定)

#### 4.4 遮へい設計

本報の経済性追求型小型炉心について炉心周りの遮へい設計として、2次元輸送計算（TWOTRANコードを用いたRZ体系）により累積高速中性子照射量（nvt）を評価した。評価点は、小型炉心では遮へい設計上最も厳しいと予想される炉心槽である。

本小型炉心では、径方向遮へい体を2層（SUS遮へい体1層とZr-H遮へい体1層）とし、その妥当性を2次元RZ輸送計算により概略計算した。図4.4-1に高速中性子照射量（60年照射）の径方向分布を示すが、炉心槽内側境界位置における値は照射制限目安（フェライト系材料； $4 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ ）を下回る見通しである。なお、本小型炉のプラントとして、ループ型が想定されており、今後原子炉容器についての遮へい性能についても確認が必要である。

なお、本小型炉の遮へい体は2層であり、H15年度の高出口温度対応金属燃料炉心（表4.3-2参照）の4層（SUS遮へい体2層と $\text{B}_4\text{C}$ 遮へい体2層）に比べて2層少ない。これは、上記のプラントはタンク型であり、炉心槽や原子炉容器の高速中性子照射量が遮へい性能の制限にならず、IHXの2次系ナトリウム配管などの線量率が制限となっていること、本小型炉では高性能の遮へい体（Zr-H遮へい体）を適用したことによると思われる。

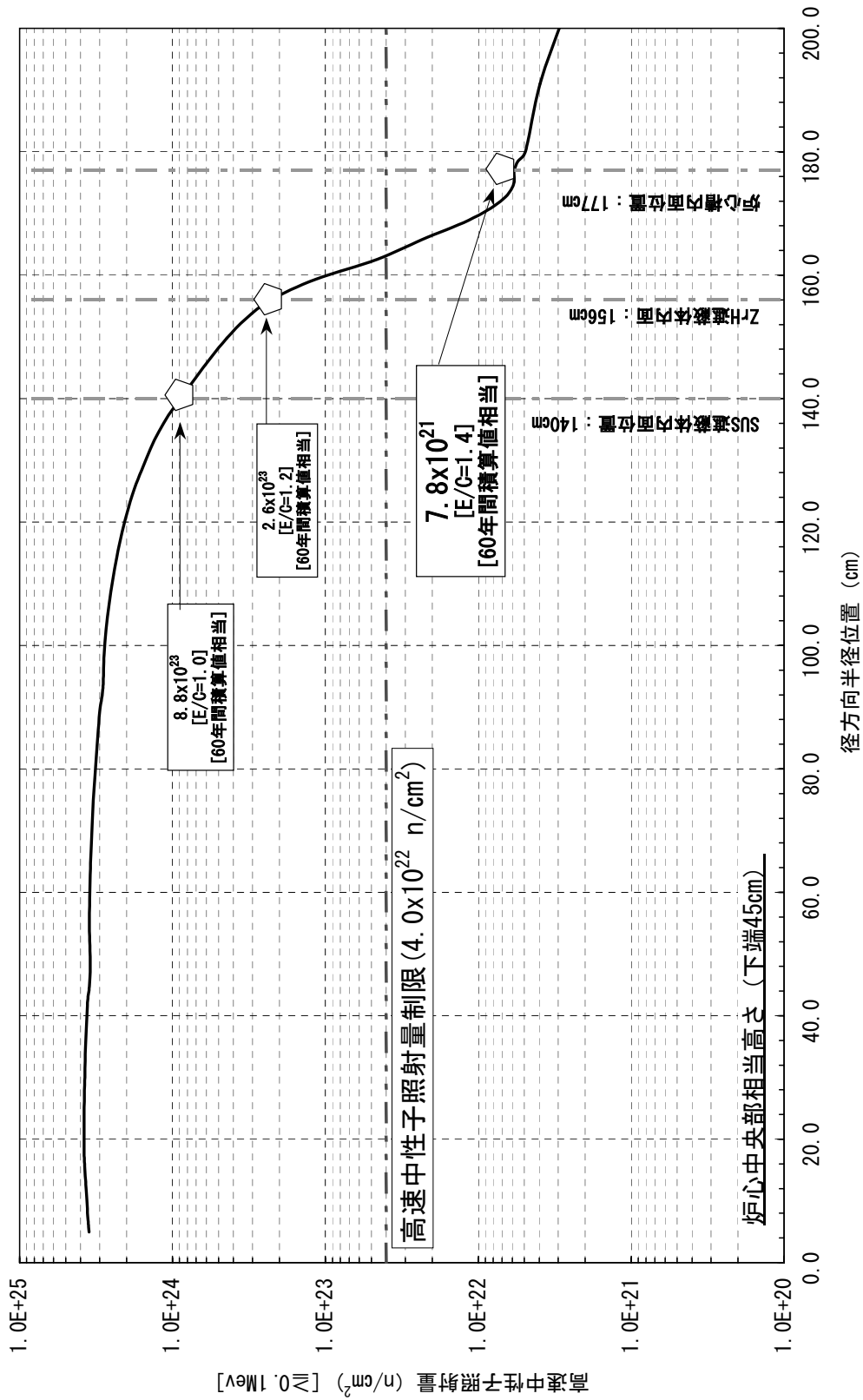


図4.4-1 経済性追求型小型炉の高速中性子照射量 (60年照射) の径方向分布 (炉心中央高さ位置)

#### 4.5 まとめ

炉心寿命は追求せずコンパクト化を目指す「経済性追求型概念」について、平成 15 年度と同様に出力分布変動が少なく出口温度高温化のポテンシャルの高い Zr 含有率多領域単一 Pu 富化度の高出口温度対応金属燃料炉心をベースとして炉心・燃料設計を実施した。

電気出力 300MWe の経済性追求型炉心は、FS の大型/中型金属燃料炉心と同様に現状の実績から見込める仕様（直近許認可性を考慮）を検討条件として、燃料交換間隔は 2 年×4 バッチで、炉心出口温度 550℃の見通しを得た。その炉心性能は、炉心高さ／等価直径：100cm/263cm、取出平均燃焼度：80Gwd/t、燃焼反応度：0.5% $\Delta k/kk'$ 、増殖比：1.03 であり、制御棒反応度収支、遮へい性能を満たすことを確認した。遮へい体外接円径は 3.4m であり、平成 15 年度検討の高温化炉心（165MWe、炉心寿命 20 年、炉心高さ：1.3m、遮へい体外接円径：3.9m）と比較すると、電気出力が約 2 倍であるにも関わらず大幅なコンパクト化を実現していることが分かる。



## 5 おわりに

実用化戦略調査研究の一環として小型高速炉の概念を検討しており、高速炉特有の特性を活かした小型高速炉の設計研究を実施している。

平成 16 年度は、魅力ある小型炉の追求の一環として、小型炉の特徴として期待される①優れた安全性、②コンパクトなシステム、③炉心長寿命化 を同時に追求するのではなく、開発目標を特化した 2 概念を検討対象とした。すなわち、僻地や離島での立地を想定してプラント寿命中燃料無交換を目指す「長寿命追求型概念」と、炉心寿命は追求せずコンパクト化を目指す「経済性追求型概念」である。本研究では、両概念について、平成 15 年度と同様に出力分布変動が少なく出口温度高温化のポテンシャルの高い Zr 含有率多領域単一 Pu 富化度の高出口温度対応金属燃料炉心をベースとして炉心・燃料設計を実施した。両概念の炉心設計で得られた設計仕様と主要炉心特性をまとめて表 5.1 に示す。

電気出力 50MWe の「長寿命追求型炉心」は、燃料密度を高める観点から、燃料無交換の特徴を活用した燃料、集合体、遮へい体の仕様を採用すると共に、今後の開発も見込んだ燃料仕様を設定して、炉心燃料交換間隔は 30 年で、炉心出口温度 550°C（水素製造の観点）の見通しを得た。その炉心性能は、炉心高さ／等価直径：101cm/182cm、遮へい体外接円径：2.3m、取出平均燃焼度：77Gwd/t、燃焼反応度：1.1% $\Delta k/kk'$ 、増殖比：1.07 であり、制御棒反応度収支、燃料健全性、遮へい性能を満たすことを確認した。また、燃焼による反応度変化が小さいため、制御棒の微調整を要しない長期運転の可能性についても示した。なお、安全解析の結果、ATWS 時に受動的炉停止機構（SASS）の作動により炉心・燃料の健全性が確保できる見通しも別報告で示されている。

電気出力 300MWe の「経済性追求型炉心」は、FS の大型/中型炉と同様に現状の実績から見込める燃料仕様を設定し、燃料交換間隔は 2 年×4 バッチで、炉心出口温度 550°C の見通しを得た。その炉心性能は、炉心高さ／等価直径：100cm/263cm、取出平均燃焼度：80Gwd/t、燃焼反応度：0.5% $\Delta k/kk'$ 、増殖比：1.03 であり、制御棒反応度収支、遮へい性能を満たすことを確認した。遮へい体外接円径は 3.4m であり、平成 15 年度検討の高温化炉心（165MWe、炉心寿命 20 年、炉心高さ：1.3m、遮へい体外接円径：3.9m）と比較すると、電気出力が約 2 倍であるにも関わらず大幅なコンパクト化を実現していることが分かる。

なお、平成 17 年度は、FS フェーズⅡの最終まとめに向けて、これまで幅広く検討してきた各種の小型炉の炉心概念の特徴・課題などを整理して、今後の小型炉の開発方針をまとめる。

今後、実用化に向けて本炉心が成立する上での技術的課題としては、太径金属燃料ピンの開発、高性能炉心燃料材料の開発、Zr 含有率多領域単一 Pu 富化度炉心概念の実証、高性能遮へい体（Zr-H）の開発、長寿命制御棒の開発などが挙げられる。

表5.1 平成16年度のナトリウム冷却小型炉の設計仕様と主要炉心特性

		長寿命追求型	経済性追求型
基本仕様	原子炉出力 (MWt/MWe)	120/50	714/300
	原子炉出口温度 (°C)	550	←
	運転サイクル長さ (年)	30	2
	燃料交換バッチ数	1	4
	炉心型式	単一Pu富化度 3領域均質	単一Pu富化度 2領域均質
	炉心高さ (cm)	101	100
	炉心等価直径 (cm)	182	263
	遮へい体外接円径 (cm)	231	336
	炉心部圧損 (MPa)	0.033	0.14
燃料仕様	燃料形態	3元合金燃料	←
	燃料ピン外径 (mm)	15.0	8.5
	被覆管肉厚 (mm)	0.78	0.50
	集合体ピッチ (mm)	188.3	157.2
	集合体間ギャップ (mm)	2.0	5.0
	集合体ラッパ管肉厚 (mm)	1.0	4.2
炉心主要特性	Pu富化度 (wt%) (内側/中間/外側)	12.1/12.1/12.1	12.3/-/12.3
	Zr含有率 (wt%) (同上)	10/10/6	10/-/6
	燃料スミア密度 (%) (同上)	70/79/85	70/-/75
	取出平均燃焼度 (GWd/t)	77	80
	燃焼反応度 (%Δk/k')	1.11	0.46
	増殖比 (平衡中期)	1.07	1.03
	最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> ) (E>0.1MeV)	5.3 × 10 <sup>23</sup>	5.2 × 10 <sup>23</sup>
	ポイド反応度 (平衡末期) (\$) )	4.3	5.5

[参考文献]

- [1] 池上哲雄、他、“炉心・燃料（燃料形態）の技術検討書 ー実用化戦略調査研究（フェーズ I）成果報告ー”、JNC TY9400 2001-011、p. 315（2001）
- [2] 高木直行、宇都成昭、“小型高速炉の炉心・燃料設計研究”、JNC TN 9400 2002-053、（2002）
- [3] 高木直行、他、“小型高速炉の炉心・燃料設計研究（その 2）”、JNC TN 9400 2003-066、（2003）
- [4] 三田敏男、他、“小型高速炉の炉心・燃料設計研究（その 3）”、JNC TN 9400 2004-031、（2004）
- [5] 杉野和輝 他 ”ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 ー2003 年度金属燃料炉心の検討”、JNC TN9400 2004-030（2004）
- [6] 電共研報告書（平成 13 年度）：Na 炉の概念に関する研究（その 3）大型炉などの概念設計（1999）