

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討

－ 2002年度金属燃料炉心の検討 －

(研究報告)

2003年6月

核燃料サイクル開発機構

大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討

－2002年度金属燃料炉心の検討－

(研究報告)

杉野和輝*1、水野朋保*1、高木直行*2

要 旨

これまでの実用化戦略調査研究における検討結果を踏まえて、核特性向上を目指した従来型均質 2 領域金属燃料炉心を構築し、酸化物燃料炉心との炉心性能の比較を行った。また、金属燃料炉心特有の炉心特性を十分に生かし、かつ、酸化物燃料炉心と同等の出口温度を有する魅力ある高出口温度対応金属燃料炉心概念を構築した。

従来型均質 2 領域炉心に関する検討の結果、次のことが分かった。

- ・炉心材料の最大高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) を炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t の酸化物燃料炉心並み ($5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$) とした炉心仕様では、酸化物燃料炉心と比較してより高い増殖性やより長い運転サイクルといった金属燃料炉心特有の性能を十分に引出せるが、炉心部取出燃焼度は 100GWd/t 程度に制約される。ただし、同じ増殖比条件下におけるブランケット領域も含めた実効取出燃焼度は酸化物燃料炉心と同等である。
- ・前述の炉心の核特性を維持しつつ炉心部取出平均燃焼度を 150GWd/t に延長させるためには、炉心材料の照射変形量を酸化物燃料炉心並みに低減させる必要がある。また、最大高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) は $7 \sim 8 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ に及ぶ。

高出口温度対応炉心について検討を行った結果、次のことが分かった。

- ・最大燃料ピン径を 8.5mm に制限し、ピン径を従来の 3 領域から 2 領域とした炉心・燃料仕様としても、被覆管内面最高温度 650°C の条件において、炉心出口/入口温度を酸化物燃料炉心と同等の 550/395°C とできる見通しである。
- ・増殖比目標 1.0 程度から 1.2 に対して、径ブランケットあるいは下部ブランケットの付加は不要であり、上部軸ブランケット長さの調整のみで対応可能である。

*1: 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 Gr

*2: 日本原子力発電機からの派遣者

本報告書は、「高速増殖炉システムの実用化調査研究に関する協力協定」に基づき実施した JNC と原電 (9 電力会社、電源開発株式会社、及び、原電の代表) との共有成果である。

Fuel and Core Design Study of the Sodium-cooled Fast Reactors
—Studies on Metallic Fuel Cores in the JFY2002—

Kazuteru SUGINO*1, Tomoyasu MIZUNO*1,
Naoyuki TAKAKI*2

Abstract

Based on the results obtained in the former feasibility study, the metallic fueled core of ordinary-type, that is, 2-region homogeneous core, has been established aiming at the improvement in the core performance, and subsequent comparison has been performed with the mixed oxide fueled core. Further, the attractive concept of the metallic fueled core of high outlet temperature has been constructed which has good nuclear features as a metallic fueled core and has identical outlet temperature to mixed oxide fuelled core.

Following items have been found as a result of the investigation on the ordinary-type core.

- The metallic fueled core whose maximum fast neutron fluence ($E_n > 0.1 \text{ MeV}$) is set identical ($5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$) to the mixed oxide fueled cores with core discharge burnup 150GWd/t has sufficient core performances as a metallic fueled core, e.g. higher breeding ratio and longer operation period compared with mixed oxide fueled cores, but the core discharge burnup is limited up to 100GWd/t. However effective discharge burnup including the contribution of the blanket region is comparative to mixed oxide cores under the same breeding ratio condition.
- In order to enlarge the core discharge burnup to 150GWd/t keeping the core performance identical to above mentioned core's, the irradiation deformation of structural material should be reduced to that of mixed oxide fueled cores. Further the maximum fast neutron fluence reaches to $7 \cdot 8 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ ($E_n > 0.1 \text{ MeV}$).

The investigations on the core of high outlet temperature have clarified following items.

- Even in the change of core regions by pin-diameter from 3-region to 2-region and in the limited maximum fuel pin diameter 8.5mm, realization of the identical outlet/inlet temperatures to the mixed oxide cores (550/395°C) is feasible under the criteria of the maximum temperature 650°C at the inner surface of the cladding.
- The constructed core accommodates the targets of breeding ratio from about 1.0 to 1.2 only by adjusting the height of the upper axial blanket, and addition of radial or lower axial blanket is not required.

*1: Fuel and Core System Engineering Group, System Engineering Technology Division,
O-arai Engineering Center, Japan

*2: Attached from The Japan Atomic Power Company (JAPC)

This report is the outcome of collaborative study between JNC and JAPC (that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC) in the accordance with "The Agreement about the Development of a Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle Systems".

目 次

1. はじめに	1
2. 金属燃料炉心の炉心・燃料設計方法	2
2.1 金属燃料炉心の設計条件と設計目標	2
2.2 金属燃料炉心の検討フロー	3
3. 従来型金属燃料炉心の概念検討	7
3.1 従来型炉心の仕様選定	7
3.1.1 検討条件	7
3.1.2 検討結果	7
3.1.2.1 集合体当たりピン本数に関するサーベイ	7
3.1.2.2 核特性サーベイ	8
3.1.3 まとめ	8
3.2 従来型炉心の核・熱特性評価	14
3.2.1 検討条件	14
3.2.1.1 炉心設計の見直し	14
3.2.1.2 核特性評価条件	14
3.2.1.3 熱特性評価条件	14
3.2.1.4 燃料健全性評価	15
3.2.2 検討結果	15
3.2.2.1 炉心設計の見直し結果	15
3.2.2.2 核特性評価結果	15
3.2.2.3 熱特性評価結果	16
3.2.2.4 燃料健全性評価	16
3.2.2.4 まとめ	16
3.3 従来型炉心の柔軟性評価	26
3.3.1 増殖比要求への柔軟性	26
3.3.2 高燃焼度化・長期運転サイクル化への柔軟性	26
3.3.3 まとめ	26
4. 高出口温度対応金属燃料炉心の概念検討	29
4.1 高出口温度対応炉心の炉心仕様選定	29
4.1.1 検討条件	29
4.1.2 検討結果	29

4.1.2.1 燃料体積比に関するサーベイ	29
4.1.2.2 ピン径3領域炉心核特性サーベイ	29
4.1.2.3 ピン径2領域炉心核特性サーベイ	30
4.1.2.4 単一ピン径2領域炉心核特性サーベイ	30
4.1.3 まとめ	31
4.2 高出口温度対応炉心の核・熱特性評価	40
4.2.1 検討条件	40
4.2.1.1 核特性評価条件	40
4.2.1.2 熱特性評価条件	40
4.2.2 検討結果	40
4.2.2.1 核特性評価結果	40
4.2.2.2 熱特性評価結果	41
4.2.2.3 まとめ	41
4.3 高出口温度対応炉心の柔軟性評価	49
4.3.1 高燃焼度化への柔軟性	49
4.3.2 長期運転サイクル化への柔軟性	49
4.3.3 増殖比要求への柔軟性	49
5. おわりに	52
6. 謝辞	53
7. 参考文献	54

表リスト

表 3.1-1	従来型炉心の核特性パラメータサーベイ結果.....	9
表 3.1-2	従来型基準炉心の炉心燃料仕様	10
表 3.1-3	従来型基準炉心の炉心主要核特性.....	10
表 3.2-1	従来型基準炉心の炉心・燃料仕様.....	17
表 3.2-2	従来型基準炉心の主要炉心核特性.....	18
表 3.2-3(1)	従来型基準炉心の物量収支 -1バッチ当たり平衡装荷燃料-	19
表 3.2-3(2)	従来型基準炉心の物量収支 -1バッチ当たり平衡取出燃料-	19
表 3.2-3(3)	従来型基準炉心の物量収支 -平衡初期燃料-	20
表 3.2-3(4)	従来型基準炉心の物量収支 -平衡末期燃料-	20
表 3.2-4	従来型基準炉心の制御反応度収支.....	21
表 3.2-5	従来型基準炉心の流量配分結果	22
表 3.2-6	従来型基準炉心における領域内最大出力燃料要素の出力履歴.....	23
表 3.2-7	従来型基準炉心における領域内最大出力燃料要素の被覆管肉厚中心温度履歴	23
表 4.1-1	高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果 -ピン径3領域-	32
表 4.1-2	高出口温度対応選定炉心の炉心燃料仕様 -ピン径3領域-	33
表 4.1-3	高出口温度対応選定炉心の炉心主要核特性 -ピン径3領域-	33
表 4.1-4	高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果 -ピン径2領域-	34
表 4.1-5	高出口温度対応選定炉心の炉心燃料仕様 -ピン径2領域-	35
表 4.1-6	高出口温度対応選定炉心の炉心主要核特性 -ピン径2領域-	35
表 4.1-7	高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果 -単一ピン径ピン本数2領域-	36
表 4.2-1	高出口温度対応基準炉心の炉心・燃料仕様	42
表 4.2-2	高出口温度対応基準炉心の主要炉心核特性	42
表 4.2-3(1)	高出口温度対応基準炉心物量収支 -1バッチ当たり平衡装荷・取出燃料-	43
表 4.2-3(2)	高出口温度対応基準炉心物量収支 -平衡初期・末期燃料-	44
表 4.2-4(1)	高出口温度対応基準炉心の制御反応度収支.....	45
表 4.2-4(2)	高出口温度対応基準炉心の制御反応度収支 (燃料スエリングを考慮)	45
表 4.2-5	高出口温度対応基準炉心の流量配分結果.....	46
表 4.3-1	高出口温度対応炉心の柔軟性評価結果.....	50

図リスト

図 2-1(1) 単一 Pu 富化度型炉心における燃焼期間中の径方向出力分布変動の比較	4
図 2-1(2) 単一 Pu 富化度型炉心における燃焼期間中の径方向最大出力分布の比較	4
図 2-2 従来型金属燃料炉心の仕様設定スキーム	5
図 2-3 高出口温度対応金属燃料炉心の仕様設定スキーム	6
図 3.1-1(1) 従来型炉心の燃料体積比及び炉心等価直径のパラメータサーベイ結果 -217 本ピン集 合体-	11
図 3.1-1(2) 従来型炉心の燃料体積比及び炉心等価直径のパラメータサーベイ結果 -271 本ピン集 合体-	12
図 3.1-1(3) 従来型炉心の燃料体積比及び炉心等価直径のパラメータサーベイ結果 -331 本ピン集 合体-	13
図 3.2-1 従来型基準炉心の径方向炉心配置図	24
図 3.2-2 従来型基準炉心の流量配分領域図	25
図 4.1-1(1) 高出口温度対応炉心の燃料体積比パラメータサーベイ結果 -炉心等価直径と燃料体 積比との関係-	37
図 4.1-1(2) 高出口温度対応炉心の燃料体積比パラメータサーベイ結果 -遮蔽体外接円径と燃料 体積比との関係-	37
図 4.1-2(1) 高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果 -遮蔽体外接円径及び炉心高 さと増殖比との関係-	38
図 4.1-2(2) 高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果 -遮蔽体外接円径及び炉心高 さと Na ボイド反応度との関係-	38
図 4.1-3 高出口温度対応サーベイ対象炉心における最大線出力の比の比較 -燃料ピン径 3 領域-	39
図 4.2-1 高出口温度対応基準炉心の径方向炉心配置図	47
図 4.2-2 高出口温度対応基準炉心の流量配分領域図	48
図 4.3-1 高出口温度対応基準炉心の径方向炉心配置図 (核特性向上炉心)	51

1. はじめに

FBR 実用化時代に求められる高い経済性や安全性の観点から、酸化物燃料の代替として金属燃料を取り上げ、金属燃料特有の挙動を反映させた、電気出力 1,500MWe 及び 750MWe を有する Na 冷却金属燃料従来型大型炉及び高出口温度対応中型炉の概念を設定することを目的とする。

これまでの検討において、酸化物燃料炉心に対して、金属燃料炉心では同じ取出燃焼度では炉心材料の高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) が増加する傾向にあり、燃料度 150GWd/t では ODS 鋼の設計制限目標値 $5 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ を超過することが知られている⁽¹⁾。また、設計制限目標値を超えた高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) 条件において照射変形上成立する燃料集合体仕様とした場合には、燃料体積比が十分に確保できず、酸化物燃料炉心に対する金属燃料炉心の核特性上の優位性はほとんど見出せないとする評価例もあることが分かっている。

そこで、本検討では、炉心材料の高速中性子照射量制限値 $5 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1\text{MeV}$) を満足する従来型均質 2 領域金属燃料炉心を構築し、酸化物燃料炉心との核・熱特性の比較・検討を行う。高速中性子照射量制限 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) を満足する炉心では燃料体積比を十分にとることができ、金属燃料炉心特有の高内部転換性の特長を考慮すれば、酸化物燃料炉心に対する核特性上の優位性を示すことが期待できる。

また、高燃焼度まで優れた炉心特性を活かす可能性を追求するために、炉心材料の高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) に対する照射変形量の合理化を仮定し、 $5 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ の高速中性子照射条件で成立する燃料集合体仕様をほぼ維持して、炉心部取出燃焼度を 150GWd/t まで増加させた炉心に対する核・熱特性評価を行う。更に、金属燃料炉心特有の低燃焼反応度特性を活かして、長期運転サイクル化についても検討を行う。

他方、革新的な炉心概念の検討として、高出口温度対応金属燃料炉心の検討を行っており、ロシアの BREST 炉心概念と類似した基本仕様を持つ単一 Pu 富化度燃料ピン径 3 領域 Na 冷却金属燃料炉心は酸化物燃料炉心と同等の出口温度達成の見通しが得られている。本検討では、燃料製造性向上の観点から、燃料ピン径の 2 領域化などの更なる炉心概念の改善を行うと共に、従来型炉心と同様に高燃焼度化や長期運転サイクル化等の柔軟性に関するポテンシャルの評価を行う。

2. 金属燃料炉心の炉心・燃料設計方法

2.1 金属燃料炉心の設計条件と設計目標

従来型均質 2 領域金属燃料炉心の検討においては酸化燃料炉心に対する相対的な魅力追求を主眼に置き、酸化燃料炉心と同様の炉心配置、同等の増殖比を有する大型炉心を構築する。燃料と被覆管との接触面における液相形成防止のために被覆管内面最高温度が 650°C に制限され、原子炉出入口温度は酸化燃料炉心に対して約 40°C 低い設定となる。その結果、熱効率が悪化するので、同じ電気出力を生み出すために必要な熱出力を増大させる必要がある。また、酸化燃料炉心に対し、中性子束スペクトルが硬いことと単位体積当たりの重金属密度が大きいことから、同じ燃焼度当たり的高速中性子照射量 ($E_n > 0.1 \text{ MeV}$) が高くなる傾向にある。反面、中性子経済に優れているために、コンパクト性、高内部転換性の特長があり、優れた核特性を有する炉心の設計が期待できる。

他方、革新的な炉心概念の検討として、ロシア BREST 炉心の基本概念を活用した高出口温度対応中型単一 Pu 富化度型炉心を構築する。単一 Pu 富化度型炉心では、図 2-1 に模式を示すように燃焼に伴う出力分布変動が小さいこと（径方向出力ピーキング係数が小さい）と集合体内の周辺流れ効果を低減できるグリッド型スペーサの採用により冷却材流量配分を合理化でき、被覆管内面温度制限 650°C の下で、酸化燃料炉心と同等の出入口温度を達成できる見通しが得られている。

以上の記述に基づき、従来型及び高出口温度対応の 2 つの炉心の基本仕様、設計条件、設計目標を以下の通りまとめる。

—基本仕様—

- ・原子炉出力 : 1,500 MWe / 3,900 MWth (従来型)
: 750 MWe / 1,785 MWth (高出口温度対応)
- ・原子炉出口 / 入口温度 : 510 °C / 355 °C (従来型)
: 550 °C / 395 °C (高出口温度対応)
- ・燃料形態 : U-Pu(TRU)-Zr (10wt%) 三元合金金属燃料
(ボンド材 : ナトリウム)
- ・燃料スミア密度 : 75%
- ・被覆管材 : ODS フェライト鋼
- ・ラップ管材 : PNC-FMS 鋼
- ・スペーサ型式 : ワイヤ型 (従来型)
: グリッド型 (高出口温度対応)
- ・スペーサ材 : PNC-FMS 鋼
- ・TRU 組成 : 金属燃料多重リサイクル組成
(Pu²³⁸/²³⁹/²⁴⁰/²⁴¹/²⁴²/Np²³⁷/Am²⁴¹/²⁴³/Cm²⁴⁴/²⁴⁵
=1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1wt%)
- ・再処理時随伴 FP 量 : 0.66vol% (0.3wt%)
- ・Pu 富化度 : 2 領域 (従来型)
: 全領域同一 (高出口温度対応)
- ・集合体基本仕様 : ラップ管付、下部軸ブランケット 5cm (従来型)
: ラップ管付、軸ブランケットなし (高出口温度対応)
- ・制御棒配置 : 切込付きコラム型 UIS 対応
- ・再臨界回避方策 : 下部軸ブランケット削除

－設計条件－

- ・ 運転サイクル長さ : 18 ヶ月以上
- ・ 遮蔽体外接円径 : 6.6m 以下 (従来型)
- : 5.5m 以下 (高出口温度対応)
- ・ バンドル部圧力損失 : 0.2 MPa 以下
- ・ 最大線出力 : 500 W/cm 以下
- ・ 被覆管温度 : 650 °C 以下 (液相形成防止)

－設計目標－

- ・ 取出平均燃焼度 : 約 150 GWd/t (ただし、見込みは 90~100 GWd/t)
- ・ 増殖比 : 1.1~1.2 (従来型)
- : 1.03 程度 (高出口温度対応)
- (Pu-241 の崩壊分 1% と増殖比の不確かさ 2% を考慮した上での維持増殖)
- ・ 高速中性子照射量 : 5.0×10^{23} n/cm² 以下 ($E_n > 0.1$ MeV)
- ・ 炉心部ボイド反応度 : 8 \$ 以下

2.2 金属燃料炉心の検討フロー

従来型炉心及び高出口対応中型炉心の検討フローをそれぞれ図 2-2、2-3 に示す。従来型炉心、高出口温度対応炉心の検討に共通して、まずは、核特性の向上を目指し、設計条件に従いながら燃料体積比をできる限り大きく確保するための燃料集合体仕様を設定するためのパラメータサーベイを行う。従来型炉心については、パラメータサーベイ結果に基づき、基本仕様を選定する。他方、高出口温度対応炉心の検討では、従来の燃料ピン径 3 領域炉心からの改良を目指し、燃料製造設備上の経済性の観点から、燃料ピン径を 2 領域、あるいは、単一ピン径とした場合の炉心概念についても検討範囲とし、核特性及び熱特性の観点から比較を行い、基準となる炉型の選択を行う。

以上のように選定された基準の従来型炉心及び高出口温度対応炉心について、核・熱特性評価、及び、高増殖、高燃焼度化、長期運転サイクル化等の要求に対する柔軟性評価を行い、魅力ある金属燃料炉心概念を提示することとする。

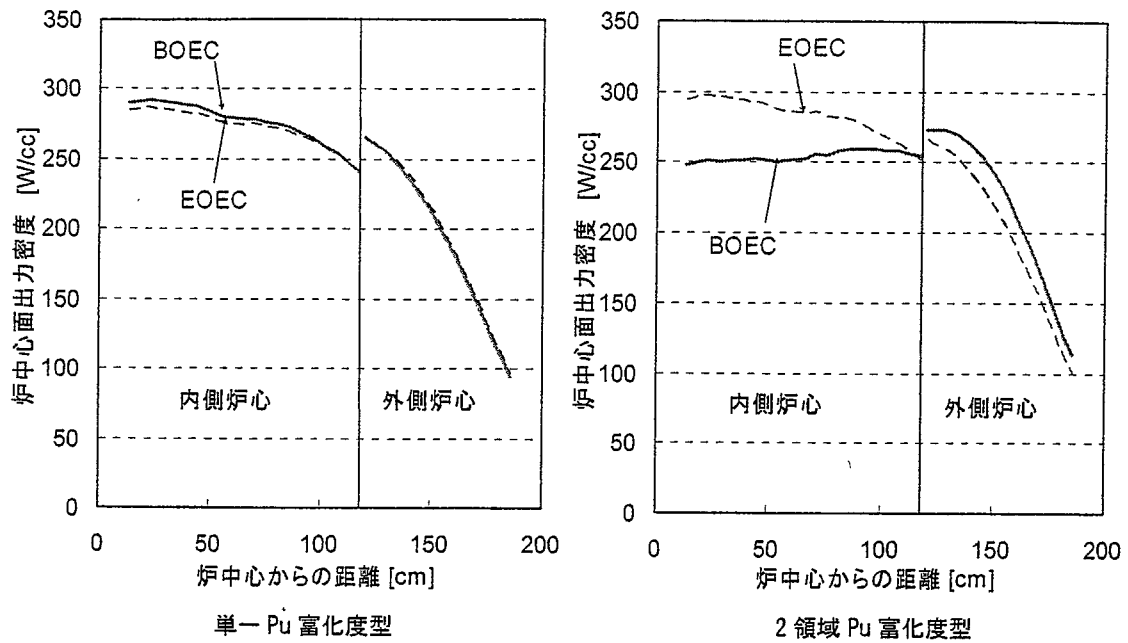


図 2-1(1) 単一 Pu 富化度型炉心における燃焼期間中の径方向出力分布変動の比較

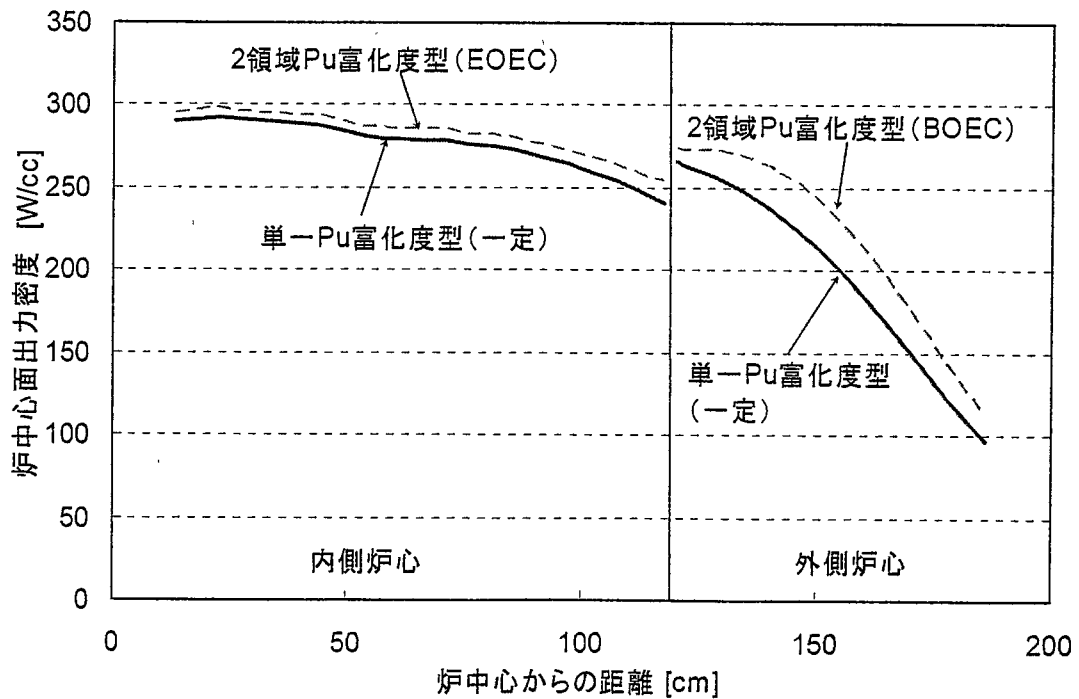


図 2-1(2) 単一 Pu 富化度型炉心における燃焼期間中の径方向最大出力分布の比較

(図 2-1 中の各炉心の径方向最大出力をプロット)

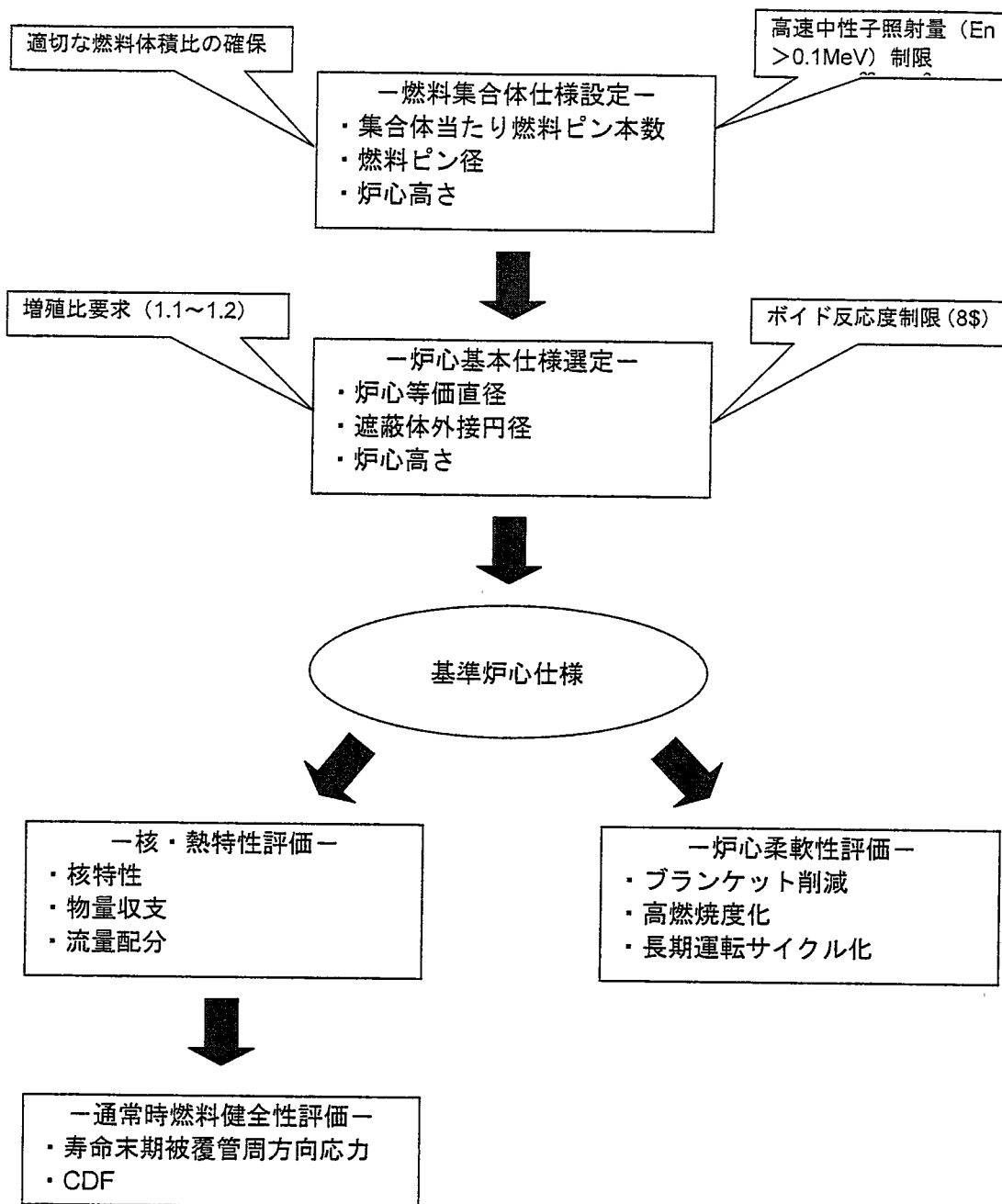


図 2-2 従来型金属燃料炉心の仕様設定スキーム

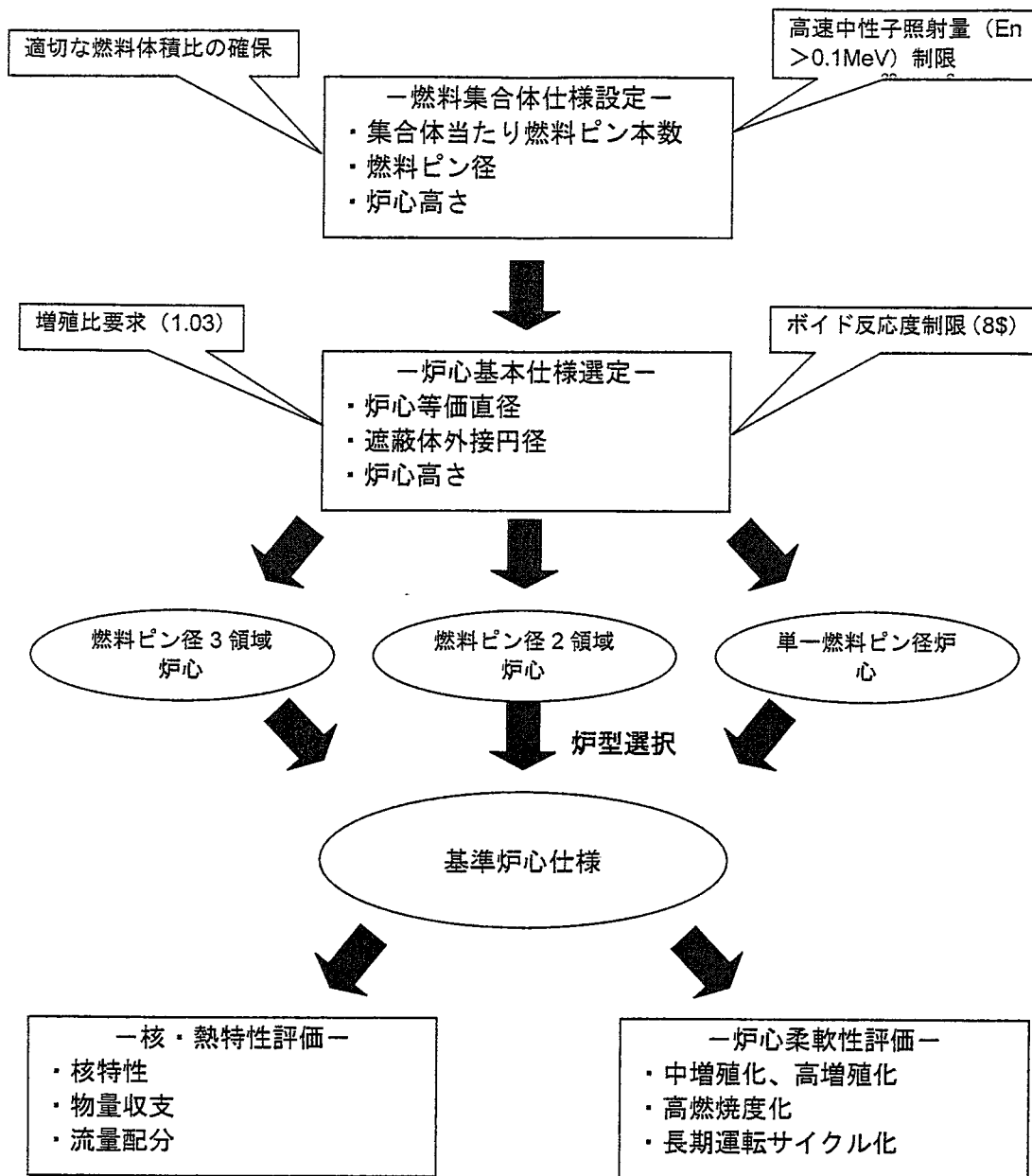


図 2-3 高出口温度対応金属燃料炉心の仕様設定スキーム

3. 従来型金属燃料炉心の概念検討

従来型金属燃料炉心として、電気出力 1,500MWe、熱出力 3,900MWt を有する大型炉心を対象とし、以下に示すとおり検討を行った。

3.1 従来型炉心の仕様選定

3.1.1 検討条件

高速中性子照射量 $6.5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1 \text{MeV}$) において、照射変形上成立する燃料集合体仕様とした場合には、燃料体積比が 38.5%と小さく、酸化物燃料炉心に対する核特性上の明らかな優位性が見出せなかった。そこで、照射変形評価式の合理化を仮定し、高速中性子照射量 $5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1 \text{MeV}$) 相当の照射変形に対して成立する燃料仕様とすることにより、燃料体積比の増大を図り、炉心核特性の向上に資する。以下に示す条件、及び、サーベイ範囲で燃料仕様の設定を行う。

—前提条件—

- ・燃料体積比：38.5%以上
- ・炉心等価直径：487cm*以下
(遮蔽体外接円径 641cm*程度以下) *: 昨年度炉心仕様
- ・バンドル部圧力損失：約 0.2MPa
- ・ラッパー管肉厚：5mm
- ・集合体配列ピッチ：200mm 以下で、ラッパー管内対面間距離に応じて、DDI (ラッパー管間相互作用) 条件を満足するように設定
- ・寿命末期被覆管周方向応力：120MPa 以下
- ・BDI (バンドルラッパー管相互作用) 量：3dw 以下
- ・P/R： 8.7×10^{-2} 程度 (実証炉における値)
- ・燃料要素数一定 (271×594 本)
- ・ガスプレナム長さ：1,550mm
- ・被覆管肉厚：最小値を 0.5mm とし燃料ピン径との比を保存
(燃料ピン径 8.5mm に対して肉厚 0.5mm)

—サーベイ範囲—

- ・炉心高さ：80cm 及び 90cm
- ・集合体当たりピン本数：217、271、331 本
- ・燃料ピン径：8～9mm

3.1.2 検討結果

3.1.2.1 集合体当たりピン本数に関するサーベイ

集合体当たりのピン本数を 217 本、271 本、331 本とした場合の燃料体積比に関するサーベイ結果を図 3.1-1(1)～3.1-1(3)にそれぞれ示す。331 本ピン集合体とした場合には、燃料体積比と集合体配列ピッチ制限から、設計ウインドウが非常に狭くなっており、選定対象から除外することとする。217 本ピンと 271 本ピン集合体については、両者とも設計ウインドウが十分な大きさであるが、同じ炉心等価直径を有する炉心間の比較より 271 本ピン集合体の方が燃料体積比が大きくとれることが分かる。従って、271 本ピン集合体を核特性上のパラメータサーベイの対象とする。なお、BDI 量については、今回のサーベイでは

律速条件とはならなかった。

3.1.2.2 核特性サーベイ

図 3.1.1(2)において、10L-②は最も燃料体積比を大きくとれる条件、10L-③は最も炉心等価直径を小さくとれる条件であることから、検討対象として取り上げる。それ以外では、炉心等価直径と燃料体積比をバランス良く設定できる条件として、10L-⑤も検討対象とし、以上3つの条件を核特性上のパラメータサーベイ対象とした。

評価結果を表 3.1-1 に示す。10L-③については炉心等価直径と遮蔽体外接円径を小さくとれるという長所があるものの、核特性上有利な点は見られない。10L-②には Na ボイド反応度に対して 1.3\$とやや大き目の余裕が見られ、増殖比の比較では 10L-⑤に劣っている。従って、増殖比が最も大きく、Na ボイド反応度が目標に対して若干の余裕がある 10L-⑤を、基準炉心の基本仕様として選定することとする。

3.1.3 まとめ

燃料体積比及び核特性のサーベイ結果より従来型基準炉心燃料仕様を選定した。選定した炉心・燃料仕様を表 3.1-2 に、予備評価で得られた主要炉心特性を表 3.1-3 にそれぞれ示す。

表 3.1-1 従来型炉心の核特性パラメータサーベイ結果

項目 \ 条件	10L-②	10L-③	10L-⑤
燃料ピン径 [mm]	8.5	8.3	8.5
集合体配列ピッチ [mm]	182.6	184.3	187.2
燃料及び制御棒 集合体数	649	583	583
炉心高さ [cm]	80	90	90
炉心等価直径 [cm]	488	465	472
遮蔽体外接円径 [cm]	643	628	638
燃料体積比	0.415	0.386	0.394
冷却材体積比	0.349	0.378	0.373
構造材体積比	0.236	0.236	0.233
増殖比	1.17	1.16	1.18
Naボイド反応度 [\$]	6.7	7.9	7.7

表 3.1-2 従来型基準炉心の炉心燃料仕様

項目	内側炉心	外側炉心
被覆管外径 [mm]	8.5	←
被覆管内径 [mm]	7.50	←
燃料ピン配列ピッチ [mm]	10.22	←
ワイヤ径 [mm]	1.67	←
ワイヤ巻付ピッチ [mm]	200.0	←
燃料ピン本数	271	←
ラッパ-管外対面間距離 [mm]	181.2	←
ラッパ-管内対面間距離 [mm]	171.2	←
集合体配列ピッチ [mm]	187.2	←
燃料集合体数	286	248
炉心高さ [cm]	90	←
炉心等価直径 [cm]	475	←
遮蔽体外接円径 [cm]	638	←

表 3.1-3 従来型基準炉心の炉心主要核特性

項目	特性値
運転サイクル長さ [ヶ月]	18
燃料交換バッチ数	4
Pu富化度 [wt%]*1	13.8 (内側炉心), 16.2 (外側炉心)
炉心部取出平均燃焼度 [GWd/t]	130
燃焼反応度 [% Δk/kk']	1.70
増殖比	1.18
最大線出力 [W/cm]	455
領域間最大線出力の比	0.86
最大高速中性子照射量 [$\times 10^{23}$ n/cm ² , En>0.1 MeV]	6.6
初装荷核分裂性Pu重量 [t/GWe]	4.3
炉心部ポイド反応度 (EOEC)*2 [%]	7.7

*1: Pu/(U+Pu) wt%

*2: $\beta_{\text{eff}}=0.00361$

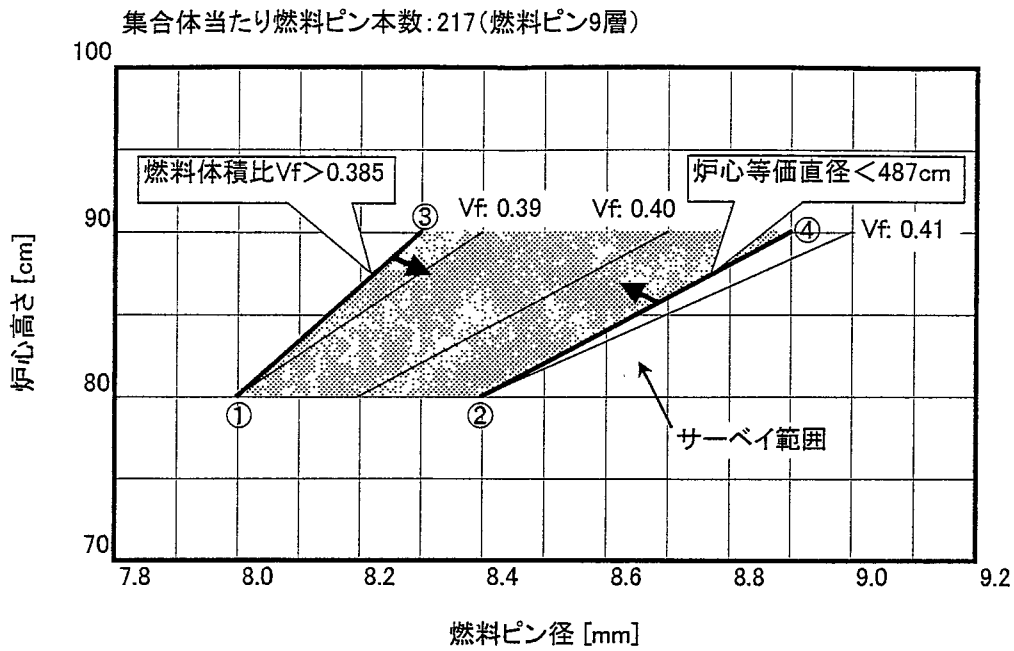


表 燃料体積比と炉心等価直径評価結果

項目 \ 条件	9L-①	9L-②	9L-③	9L-④
燃料ピン径 [mm]	8.0	8.4	8.3	8.9
炉心高さ [cm]	80	80	90	90
炉心等価直径 [cm]	471	487	467	489
燃料体積比	0.391	0.410	0.385	0.408

図 3.1-1(1) 従来型炉心の燃料体積比及び炉心等価直径のパラメータサーベイ結果
 -217 本ピン集合体-

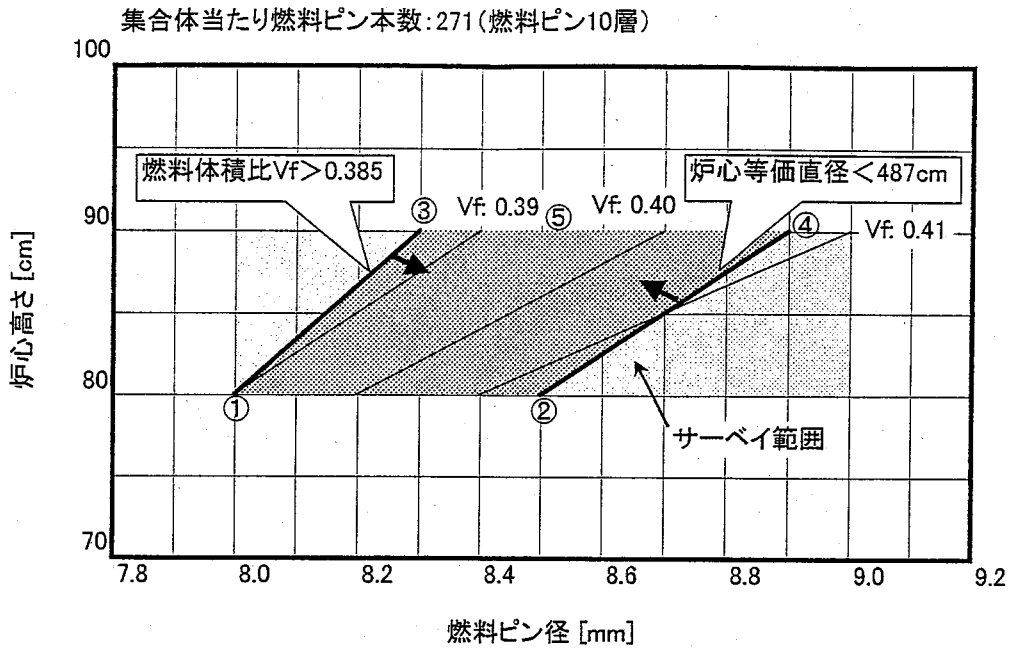


表 燃料体積比と炉心等価直径評価結果及び主要核特性評価結果

項目 \ 条件	10L-①	10L-②	10L-③	10L-④	10L-⑤
燃料ピン径 [mm]	8.0	8.5	8.3	8.9	8.5
炉心高さ [cm]	80	80	90	90	90
炉心等価直径 [cm]	468	488	465	486	472
燃料体積比	0.393	0.415	0.386	0.407	0.394

図 3.1-1(2) 従来型炉心の燃料体積比及び炉心等価直径のパラメータサーベイ結果
-271本ピン集合体-

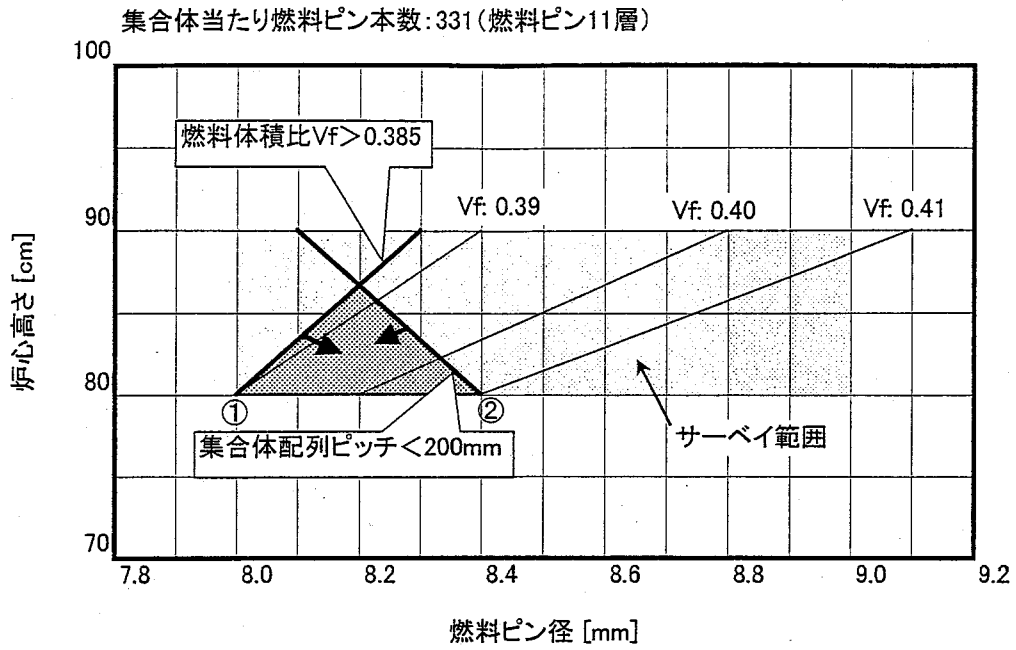


表 燃料体積比と炉心等価直径評価結果

項目 \ 条件	11L-①	11L-②
燃料ピン径 [mm]	8.0	8.4
炉心高さ [cm]	80	80
炉心等価直径 [cm]	471	487
燃料体積比	0.392	0.409

図 3.1-1(3) 従来型炉心の燃料体積比及び炉心等価直径のパラメータサーベイ結果
—331本ピン集合体—

3.2 従来型炉心の核・熱特性評価

3.2.1 検討条件

3.1 で選定した炉心仕様を基本に、最大高速中性子照射量制限 $5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1 \text{MeV}$) を満足する従来型基準炉心仕様を設定する。得られた基準炉心について、核特性及び熱特性評価を行う。

3.2.1.1 炉心設計の見直し

3.1 で選定した従来型炉心の核特性は表 3.1-3 に示されているとおりであるが、最大高速中性子照射量 ($E_n > 0.1 \text{MeV}$) は $6.6 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ と制限の $5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ を満たしておらず、炉心設計上の対応が必要である。また、領域間の最大線出力の比、すなわち、内側炉心に対する外側炉心の最大線出力が 0.86 と約 15% の差が見られるが、見直し後は出力分布の改善が望ましいと考えられる。

3.2.1.2 核特性評価条件

炉定数として、統合炉定数 ADJ2000R⁽²⁾ を使用した。核特性は基本的には 2 次元 RZ 体系拡散計算に基づく結果であるが、高速中性子照射量 ($E_n > 0.1 \text{MeV}$)、線出力、流量配分用の集合体出力分布については 3 次元体系解析を用いた。Pu 富化度の設定では、燃焼サイクル期間中の最小固有値条件を 0.994 とした。核特性の補正としては、Na ボイド反応度の非均質補正 0.90、ドップラー係数の輸送・メッシュ補正 1.05 をそれぞれ適用した。再処理時に随伴する FP の取り扱いについては、Nd-143 で代表させ、FP 等価係数: 1.0 を適用する。

3.2.1.3 熱特性評価条件

核特性評価より得られた集合体出力分布を基に、従来設計研究と同様に最大 8 領域の流量配分計画について評価を行う。液相形成防止の観点から被覆管内面最高温度を 650°C 制限とし、炉心出入口温度 $355^\circ\text{C}/509^\circ\text{C}$ を目指して流量配分を行う。燃料集合体内の温度分布はサブチャンネル解析により行い、次表に示す工学的安全係数を基にホットスポットファクターを算出し、被覆管のホットスポット温度を求める。

表 金属燃料炉心解析で用いる工学的安全係数 (ワイヤ型スペーサ)

処理方法	工学的安全因子	ΔT_{Na}	ΔT_{film}	ΔT_{clad}
乗算項	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心熱出力校正誤差		1.02	1.02
	流路変形効果	1.03		
	集合体間流量配分誤差	1.05		
	原子炉出入口温度誤差	1.02		
	ワイヤコンタクト効果		2.00	
統計項 (3σ)	炉内流量配分誤差	1.03		
	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		1.04	1.08

炉心燃料への分配可能な流量としては、酸化物炉心の設計と同様に 90%とする。なお、被覆管内面最高温度制限を満足できない場合には、流量配分条件は変更せずに、温度制限を満足するように出入口温度を低下させることとする。

3.2.1.4 燃料健全性評価

熱特性評価において求めた流量配分計画に基づき、領域内で最大出力を有する燃料要素の出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴を求める。次に、両履歴に基づき、被覆管の内面及び外面の腐食、液相形成による浸食、FP ガス放出による内圧増加を考慮し、寿命末期における被覆管周方向応力とクリープ寿命分数和 (CDF) を算出し、燃料健全性評価に資する。

3.2.2 検討結果

3.2.2.1 炉心設計の見直し結果

最大高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) は $6.6 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ と制限の約 4/3 倍であり、更に、運転サイクル長さは設計条件より短縮が不可能であることから、燃料交換バッチ数を 4 から 3 に低下させることとした。また、増殖比や Na ボイド反応度の悪化を抑え、出力分布を改善するために合計燃料集合体数は変更せずに、内側炉心燃料集合体を 286 体から 336 体増加させた。見直し後の炉心・燃料仕様を表 3.2-1 に、径方向炉心配置を図 3.2-1 にそれぞれ示す。

3.2.2.2 核特性評価結果

炉心設計の見直し後の主要炉心核特性評価結果を酸化物炉心との比較も含めて表 3.2-2 に示す。炉心部取出燃焼度は約 10 万 MWd/t 程度となっている。増殖比、Na ボイド反応度、最大高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) 等の核特性は目標を満足しており、炉心領域間の最大線出力もほぼ同等となった。酸化物燃料炉心との比較では、Pu 富化度は非常に低く設定でき、燃焼反応度は約 1/3 程度である。実効燃焼度は低めとなっているが、次節の柔軟性評価のところで示すように、径ブランケットを削減することにより増殖比を酸化物燃料炉心と同程度とした場合には、実効燃焼度においても劣勢は見られなくなる込みである。以上のように、酸化物燃料炉心に対して、核特性上の明らかな長所を持つ金属燃料炉心を構築することができた。

平衡炉心の物量収支を表 3.2-3(1)~3.2-3(4)に示す。表より、核分裂性 Pu について、1 サイクル (1.5 年) 当たりの利得は約 460kg であり、燃焼初期全核分裂性 Pu の約 7%分に当たることから、倍になるまでに要するサイクルはおよそ 14 サイクル (約 20 年) であることが分かる。

制御反応度収支の評価結果を表 3.2-4 に示す。また、必要反応度の設定根拠と制御棒価値の評価法を表 3.2-4 の下に示す。本炉心では、燃料集合体当たりの制御棒の割合を酸化物燃料炉心と同等としているが、金属燃料炉心は燃焼反応度が酸化物燃料炉心よりも小さいために、停止余裕は大き過ぎる結果となり、今後は制御棒集合体本数を減少させるか、制御棒吸収材の B-10 濃縮度を減少させるなどの合理化が必要であると考えられる。また、金属燃料炉心では、燃料のスエリングが燃焼初期において非常に大きいので、スエリングによる影響も計画余剰反応度として計上する必要があるであろう。

3.2.2.3 熱特性評価結果

3次元炉心計算により得られた集合体出力分布を基に、炉心流量配分領域を図 3.2-2 に示すように設定した。設定した流量領域区分に従い、流量配分を行った結果、出入口温度を 509/355℃とした場合には被覆管内面最高温度を 650℃以下に抑えるには流量が不足していることが分かった。そこで、出入口温度を低下させていくことにより炉心領域への流量を合理化したところ、出入口温度を 3℃下げて 506/352℃とした場合に、流量不足は解消された。その時の流量配分結果を表 3.2-5 に示す。なお、バンドル部圧力損失は制限の 0.2MPa を満たしている。

3.2.2.4 燃料健全性評価

流量配分計画を基に得られた領域内最大出力燃料要素の出力履歴を表 3.2-6 に、同燃料要素の被覆管肉厚中心温度履歴及び寿命末期被覆管周方向応力の評価結果を表 3.2-7 にそれぞれ示す。寿命末期被覆管周方向応力については、従来の設計で設定された制限目安 120MPa を満足していることが分かる。また、CDF については最大で 5.1×10^{-3} であり、制限の 0.5 を大きく下回っていることが分かった。

3.2.2.4 まとめ

酸化物燃料炉心に対して金属燃料炉心特有の核特性上の長所を引き出し、高速中性子照射量制限 $5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1 \text{MeV}$) を満足する従来型金属燃料炉心仕様を設定した。炉心特性については、酸化物燃料に対して燃焼反応度や増殖比について明らかな長所が見いだされた。炉心部取出燃焼度については 10 万 MWd/t に制約されるが、径ブランケットを削減することにより、酸化物燃料炉心と同程度の増殖比とすれば、実効燃焼度についても酸化物燃料炉心と同等となる見通しである。流量配分の結果、原子炉出入口温度は 506/352℃となった。また、燃料健全性については特に問題は見られなかった。

今後は、制御棒停止余裕が過度に設けられているので、その合理化を行うと共に、金属燃料のスエリングに対する対応を考慮した設計について検討を行う必要があると考えられる。

表 3.2-1 従来型基準炉心の炉心・燃料仕様

項目	金属燃料炉心		酸化物燃料炉心(参考)	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
被覆管外径 [mm]	8.5	←	8.8	←
被覆管内径 [mm]	7.50	←	7.76	←
燃料ピン配列ピッチ [mm]	10.22	←	10.12	←
ワイヤ径 [mm]	1.67	←	1.27	←
ワイヤ巻付ピッチ [mm]	200.0	←	200.0	←
燃料ピン本数	271	←	271	←
ラッパー管外対面間距離 [mm]	181.2	←	179.2	←
ラッパー管内対面間距離 [mm]	171.2	←	169.2	←
集合体配列ピッチ [mm]	187.2	←	183.2	←
燃料集合体数	336	198	316	278
炉心高さ [cm]	90		80	
炉心等価直径 [cm]	472		490	
遮蔽体外接円径 [cm]	638		645	

表 3.2-2 従来型基準炉心の主要炉心核特性

項目	金属燃料炉心	酸化物燃料炉心(参考)
運転サイクル長さ [ヶ月]	18	18
燃料交換バッチ数	3	4
Pu富化度 [wt%] ^{*1}	12.8 (内側炉心), 17.7 (外側炉心)	21.7 (内側炉心), 24.4 (外側炉心)
取出平均燃焼度 [GWd/t]	47	63
(炉心部/軸ブラ/径ブラ)	(98/8/4)	(148/-/-)
燃焼反応度 [%Δk/kk']	0.98	3.2
増殖比	1.23	1.16
(炉心部/軸ブラ/径ブラ)	(0.90/0.17/0.16)	(0.74/0.30/0.12)
最大線出力 ^{*2} [W/cm]	463	420
領域間最大線出力の比	1.01	1.00
最大高速中性子照射量 ^{*2} [$\times 10^{23}$ n/cm ² , E _n >0.1 MeV]	4.8	4.6
初装荷核分裂性Pu重量 [t/GWe]	4.2	4.4
炉心部ポイド反応度 (EOEC) ^{*3} [\$]	7.5	5.8
炉心部ドップラー係数 (EOEC) ^{*4} [$\times 10^{-3}$ Tdk/dT]	-4.1	-4.7
原子炉倍増時間 [年]	20	35
複合システム倍増時間 [年]	32	48

*1: Pu/(U+Pu) wt%

*2: 3次元体系解析結果

*3: 非均質効果0.90を考慮。β_{eff}=0.00361

*4: 輸送・メッシュ補正1.05を考慮。

表 3.2-3(1) 従来型基準炉心の物量収支 -1 バッチ当たり平衡装荷燃料-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	33.3	18.5	51.8	30.7	46.1	76.8	128.6
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	11,066.2	6,151.4	17,217.6	10,197.0	15,305.4	25,502.4	42,720.0
U合計	11,099.5	6,169.9	17,269.4	10,227.7	15,351.5	25,579.2	42,848.6
Np-237	6.7	5.5	12.2	0.0	0.0	0.0	12.2
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	6.7	5.5	12.2	0.0	0.0	0.0	12.2
Pu-238	16.9	13.6	30.5	0.0	0.0	0.0	30.5
Pu-239	1,113.0	900.6	2,013.6	0.0	0.0	0.0	2,013.6
Pu-240	425.0	343.9	768.9	0.0	0.0	0.0	768.9
Pu-241	40.5	32.7	73.2	0.0	0.0	0.0	73.2
Pu-242	40.5	32.8	73.3	0.0	0.0	0.0	73.3
Pu合計	1,635.9	1,323.6	2,959.5	0.0	0.0	0.0	2,959.5
Am-241	27.0	21.8	48.8	0.0	0.0	0.0	48.8
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	8.4	6.8	15.2	0.0	0.0	0.0	15.2
Am合計	35.4	28.6	64.0	0.0	0.0	0.0	64.0
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	6.7	5.5	12.2	0.0	0.0	0.0	12.2
Cm-245	1.7	1.4	3.1	0.0	0.0	0.0	3.1
Cm合計	8.4	6.9	15.3	0.0	0.0	0.0	15.3
合計	12,785.9	7,534.5	20,320.4	10,227.7	15,351.5	25,579.2	45,899.6
FP ¹	38.5	22.7	61.1	0.0	0.0	0.0	61.1
FP ²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 運転中生成FP

表 3.2-3(2) 従来型基準炉心の物量収支 -1 バッチ当たり平衡取出燃料-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	12.1	8.4	20.5	22.8	37.7	60.5	81.0
U-236	4.0	1.9	5.9	1.7	1.9	3.6	9.5
U-238	9,729.4	5,550.7	15,280.1	9,833.3	14,950.2	24,783.5	40,063.6
U合計	9,745.5	5,561.0	15,306.5	9,857.8	14,989.8	24,847.6	40,154.1
Np-237	6.5	4.9	11.4	0.5	0.5	1.0	12.4
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	6.5	4.9	11.4	0.5	0.5	1.0	12.4
Pu-238	16.9	13.4	30.3	0.1	0.1	0.2	30.5
Pu-239	1,126.8	745.8	1,872.6	282.7	294.5	577.2	2,449.8
Pu-240	461.2	344.5	805.7	12.9	8.2	21.1	826.8
Pu-241	59.3	41.6	100.9	0.5	0.2	0.7	101.6
Pu-242	40.4	31.8	72.2	0.0	0.0	0.0	72.2
Pu合計	1,704.6	1,177.1	2,881.7	296.2	303.0	599.2	3,480.9
Am-241	20.0	18.0	38.0	0.0	0.0	0.0	38.0
Am-242m	1.2	0.9	2.1	0.0	0.0	0.0	2.1
Am-243	9.7	7.5	17.2	0.0	0.0	0.0	17.2
Am合計	30.9	26.4	57.3	0.0	0.0	0.0	57.3
Cm-242	1.3	0.9	2.2	0.0	0.0	0.0	2.2
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm-244	7.7	5.7	13.4	0.0	0.0	0.0	13.4
Cm-245	1.6	1.2	2.8	0.0	0.0	0.0	2.8
Cm合計	10.7	7.9	18.6	0.0	0.0	0.0	18.6
合計	11,498.2	6,777.3	18,275.5	10,154.5	15,293.3	25,447.8	43,723.3
FP ¹	38.5	22.7	61.1	0.0	0.0	0.0	61.1
FP ²	1,287.7	757.2	2,044.9	73.2	58.2	131.4	2,176.3

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 運転中生成FP

表 3.2-3(3) 従来型基準炉心の物量収支 —平衡初期燃料—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	73.8	43.5	117.3	83.4	129.3	212.7	330.0
U-236	5.2	2.3	7.5	1.9	2.0	3.9	11.4
U-238	31,819.1	17,840.5	49,659.6	30,223.0	45,558.8	75,781.8	125,441.4
U合計	31,898.1	17,886.3	49,784.4	30,308.3	45,690.1	75,998.4	125,782.8
Np-237	20.0	15.8	35.8	0.6	0.5	1.1	36.9
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	20.0	15.8	35.8	0.6	0.5	1.1	36.9
Pu-238	50.0	40.2	90.2	0.0	0.0	0.0	90.2
Pu-239	3,388.4	2,530.5	5,918.9	310.0	312.9	622.9	6,541.8
Pu-240	1,314.0	1,037.1	2,351.1	7.9	4.8	12.7	2,363.8
Pu-241	144.7	109.6	254.3	0.2	0.1	0.3	254.6
Pu-242	120.8	97.1	217.9	0.0	0.0	0.0	217.9
Pu合計	5,017.9	3,814.5	8,832.4	318.1	317.8	635.9	9,468.3
Am-241	71.7	60.6	132.3	0.0	0.0	0.0	132.3
Am-242m	1.7	1.2	2.9	0.0	0.0	0.0	2.9
Am-243	26.7	21.2	47.9	0.0	0.0	0.0	47.9
Am合計	100.1	83.0	183.1	0.0	0.0	0.0	183.1
Cm-242	2.8	1.8	4.6	0.0	0.0	0.0	4.6
Cm-243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	21.2	16.6	37.8	0.0	0.0	0.0	37.8
Cm-245	4.9	3.9	8.8	0.0	0.0	0.0	8.8
Cm合計	29.1	22.4	51.5	0.0	0.0	0.0	51.5
合計	37,065.2	21,822.0	58,887.2	30,627.0	46,008.4	76,635.4	135,522.6
FP ¹	115.4	68.0	183.4	0.0	0.0	0.0	183.4
FP ²	1,292.5	781.5	2,074.0	56.1	46.1	102.2	2,176.2

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 運転中生成FP

表 3.2-3(4) 従来型基準炉心の物量収支 —平衡末期燃料—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	52.5	33.5	86.0	75.5	121.0	196.5	282.5
U-236	9.1	4.2	13.3	3.7	3.9	7.6	20.9
U-238	30,479.5	17,244.3	47,723.8	29,857.8	45,205.4	75,063.2	122,787.0
U合計	30,541.1	17,282.0	47,823.1	29,937.0	45,330.3	75,267.3	123,090.4
Np-237	19.8	15.2	35.0	1.1	1.1	2.2	37.2
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	19.8	15.2	35.0	1.1	1.1	2.2	37.2
Pu-238	50.1	39.9	90.0	0.1	0.1	0.2	90.2
Pu-239	3,401.8	2,376.7	5,778.5	593.5	606.1	1,199.6	6,978.1
Pu-240	1,350.1	1,037.9	2,388.0	20.9	12.9	33.8	2,421.8
Pu-241	163.5	118.5	282.0	0.7	0.3	1.0	283.0
Pu-242	120.6	96.2	216.8	0.0	0.0	0.0	216.8
Pu合計	5,086.1	3,669.2	8,755.3	615.2	619.4	1,234.6	9,989.9
Am-241	64.7	56.8	121.5	0.0	0.0	0.0	121.5
Am-242m	2.9	2.1	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0
Am-243	28.0	21.9	49.9	0.0	0.0	0.0	49.9
Am合計	95.6	80.8	176.4	0.0	0.0	0.0	176.4
Cm-242	4.1	2.7	6.8	0.0	0.0	0.0	6.8
Cm-243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm-244	22.2	16.8	39.0	0.0	0.0	0.0	39.0
Cm-245	4.7	3.7	8.4	0.0	0.0	0.0	8.4
Cm合計	31.3	23.4	54.7	0.0	0.0	0.0	54.7
合計	35,773.9	21,070.6	56,844.5	30,553.3	45,950.8	76,504.1	133,348.6
FP ¹	115.4	68.0	183.4	0.0	0.0	0.0	183.4
FP ²	2,583.8	1,532.9	4,116.7	129.8	103.7	233.5	4,350.2

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 運転中生成FP

表 3.2-4 従来型基準炉心の制御反応度収支

項目	主系	後備炉停止系	
	1ロッドスタック	1ロッドスタック	全数挿入
1.計画余剰反応度	1.9	0.2	0.3
a)出力補償	0.3	0.2	0.3
b)燃焼補償	1.4		
c)運転余裕	0.2		
2.余剰反応度の不確かさ(2 σ)	0.5	0.2	0.3
a)臨界性予測誤差	0		
b)出力補償予測誤差		0.16	0.22
c)燃料製作公差	0.46		
d)燃料交換余裕	0.2		
3.事故時投入反応度		0.7	0.7
4.最小反応度停止余裕	0.4		
必要制御反応度	2.8	1.1	1.3
補正後制御棒価値	5.8	2.1	2.5
反応度停止余裕	3.0	1.0	1.2

単位: % $\Delta k/kk'$

補足表 必要反応度の設定根拠と制御棒価値評価法

項目	設定根拠
1.計画余剰反応度	
a) 出力補償	定常状態から温態待機状態 (300°C) あるいは低温停止状態 (180°C) への移行によるドブラー反応度と膨張反応度の和
b) 燃焼補償	燃焼反応度とその誤差 (0.3% $\Delta k/kk'$) の和
c) 運転余裕	0.2% $\Delta k/kk'$
2.余剰反応度の不確かさ(2 σ)	
a) 臨界性予測誤差	将来見込みとして0と設定
b) 出力補償予測誤差	10% (1 σ)
c) 燃料製作公差	1.18% $\Delta k/kk'$ (単バッチ、3 σ)
d) 燃料交換余裕	0.1% $\Delta k/kk'$ (1 σ)
3.事故時投入反応度	暫定で0.7% $\Delta k/kk'$ (2 β)
4.反応度停止余裕	0.4% $\Delta k/kk'$ (1 β)
必要制御反応度	1.~4.の合計
補正後制御棒価値	ノミナル値に対し各種補正 ^{*1} (0.77) 及び不確かさ9% (3 σ) を考慮
反応度停止余裕	(補正後制御棒価値) - (必要制御反応度)

*1: 群縮約効果、ランピング効果、輸送効果、メッシュ効果に基づく補正

表 3.2-5 従来型基準炉心の流量配分結果

炉心領域	領域番号	集集体数	集集体流量		燃料要素 最大出力 [kW]	被覆管最高 温度 [°C]	圧力損失 [MPa]
			[kg/s]	必要 領域流量 [kg/s]			
内側炉心	1	72	39.7	2858.4	36.5	649	0.19
	2	94	35.7	3355.8	33.1	649	0.16
	3	114	31.6	3602.4	29.6	649	0.12
	4	56	28.6	1598.8	27.0	649	0.10
外側炉心	5	46	37.3	1715.8	34.5	649	0.17
	6	86	34.7	2984.2	32.3	649	0.15
	7	42	29.7	1247.4	28.0	649	0.11
	8	24	25.8	619.2	24.6	649	0.09
合計	—	534	—	17982.0	—	—	—
			炉心流量 ^{*1} [kg/s]	17986.5			
			余剰流量 [kg/s]	+4.5			

*1: 全炉心流量の内、90%を燃料集集体冷却用に配分

※出入口温度を 506 / 352°Cと設定

表 3.2-6 従来型基準炉心における領域内最大出力燃料要素の出力履歴

炉心	流量領域	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル	
		BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
内側炉心	1	27.9	35.8	28.9	36.4	29.3	36.5
	2	26.8	32.7	27.6	33.1	27.9	33.1
	3	27.2	29.3	28.0	29.6	28.4	29.6
	4	25.3	26.4	26.0	26.7	26.3	26.7
外側炉心	5	34.4	30.2	32.8	28.9	31.3	27.8
	6	31.9	28.0	30.3	26.7	29.0	25.6
	7	28.0	23.6	27.1	23.0	26.3	22.4
	8	24.6	20.5	23.8	20.0	23.1	19.4

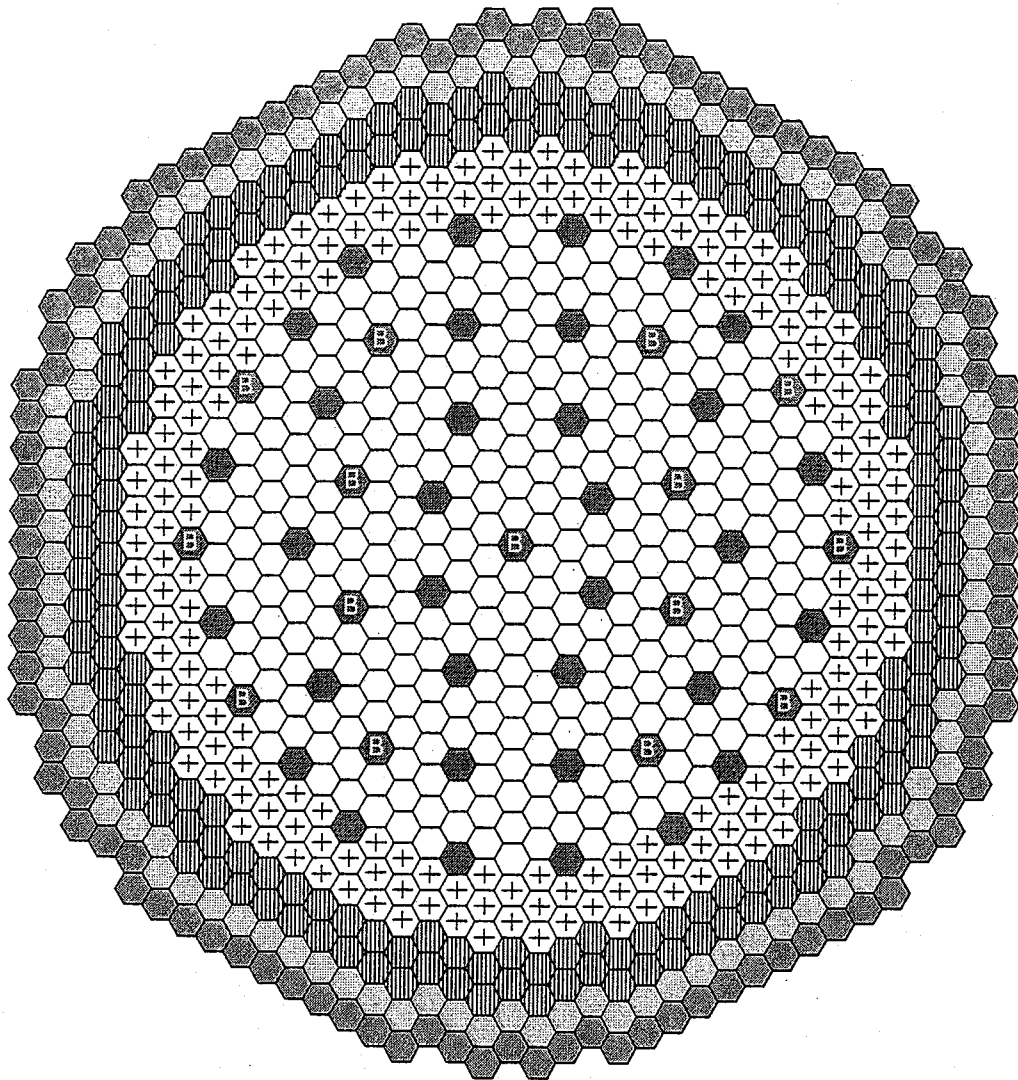
※単位: kW

表 3.2-7 従来型基準炉心における領域内最大出力燃料要素の被覆管肉厚中心温度履歴

炉心	流量領域	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		燃焼度*1 [GWd/t]	被覆管周方向 応力*1 [MPa]
		BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC		
内側炉心	1	571	633	578	637	581	638	126	107
	2	584	635	591	639	594	639	117	100
	3	616	636	624	640	627	640	111	100
	4	622	635	630	638	633	638	102	90
外側炉心	5	638	603	624	593	612	583	120	93
	6	636	601	622	590	609	580	111	84
	7	640	596	632	589	623	582	97	74
	8	641	594	633	587	624	581	85	63

*1: 寿命末期

※単位: °C










- | | |
|---|--|
|  内側炉心燃料集合体 (336体) |  ステンレス鋼遮蔽体 (102体) |
|  外側炉心燃料集合体 (198体) |  ZrH遮蔽体 (108体) |
|  径方向ブランケット燃料集合体 (186体) |  主系制御棒 (34体) |
| |  後備系制御棒 (15体) |

図 3.2-1 従来型基準炉心の径方向炉心配置図

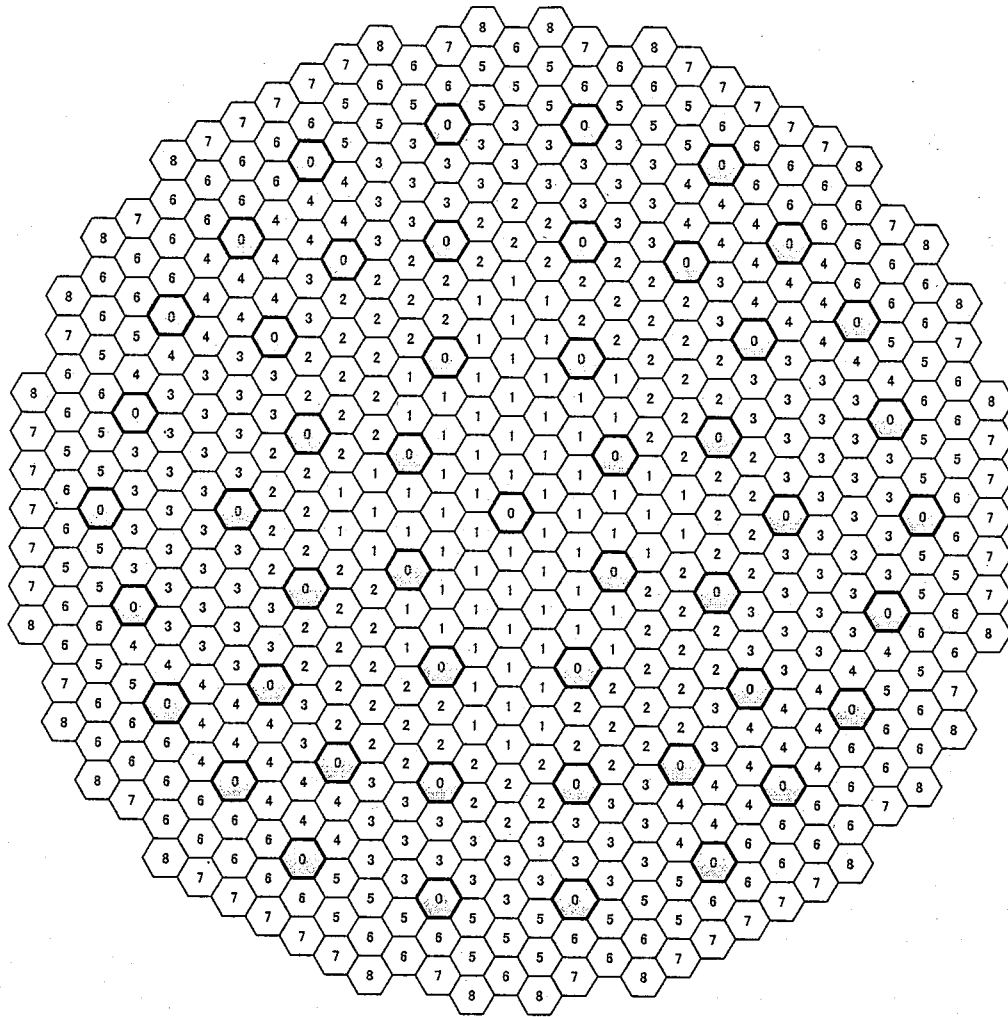


図 3.2-2 従来型基準炉心の流量配分領域図

3.3 従来型炉心の柔軟性評価

3.2節までは高速中性子照射量制限 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) や寿命末期被覆管周方向応力の制限目安を考慮した従来型金属燃料を用いた基準炉心の構築を行ったが、本節では、それらの制限の合理化を前提条件とした金属燃料炉心の柔軟性を評価し、金属燃料炉心の魅力の明確化を図ることとする。

基準炉心に対する一連の柔軟性の評価結果を表 3.3-1 に示す。以下、個別の柔軟性評価結果について述べる。

3.3.1 増殖比要求への柔軟性

(表 3.3-1 の「径ブランケット削除」の列を参照)

径ブランケットを 2 層もつ基準炉心の増殖比は約 1.2 であり、十分な高増殖性能を有していると考えられるので、ここでは、径ブランケットの削減により、より低い増殖比要求への対応性について評価を行った。2 層の径ブランケットを全て削除した場合、増殖比は約 1.1 程度となったが、他の核特性への影響は特に見られない。実効取出燃焼度は基準炉心の約 50GWd/t から 70GWd/t に向上している。なお、基準炉心の炉心部取出燃焼度は約 100GWd/t であるが、径ブランケット量の調整により増殖比を酸化燃料炉心と同じ 1.16 程度にした場合には、線形内挿により実効燃焼度は 59GWd/t と見積もられ、炉心部取出燃焼度が 150GWd/t である酸化燃料炉心の実効燃焼度 63GWd/t に対して特に劣るものではないことが分かる。

3.3.2 高燃焼度化・長期運転サイクル化への柔軟性

(表 3.3-1 の「高燃焼度化」、「長期運転サイクル化」の列を参照)

炉心材料の照射変形評価式の合理化を仮定し、基準炉心と同じ燃料集合体仕様で炉心部取出燃焼度を 150GWd/t まで高めるために、運転サイクル長さを 18 ヶ月から 21 ヶ月に延長し、燃料交換バッチ数を 3 から 4 に増加させた。核特性評価の結果、増殖比はやや減少し、酸化燃料炉心程度となったが、燃焼反応度は運転サイクル長さが 3 ヶ月長いにもかかわらず、酸化燃料炉心の 2/3 程度である。実効燃焼度については高燃焼度化炉心では酸化燃料炉心に対して明らかに有利である。燃焼反応度を酸化燃料炉心と同程度となるように長期運転サイクル化した場合には、28 ヶ月の運転が可能な見込みである。ただし、高燃焼度化炉心では、高速中性子照射量は $7 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ 以上 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) と $5 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ を大きく超えている。

通常運転時の燃料健全性については、高燃焼度化炉心ではガスプレナム長さを基準炉心の 1,550mm から、バンドル部圧力損失制限を満たす最大の長さ 1,750mm に延長させているが、CDF 値については最大 0.37 という結果が得られ、0.5 以下と問題は見られないものの、寿命末期周方向応力は最大 174MPa と従来の制限目安 120MPa を大きく上回り、寿命末期被覆管周方向応力の制限目安の合理化等の対応が必要である。

3.3.3 まとめ

高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) の制限により、炉心部取出燃焼度は 100GWd/t に制約されるが、金属燃料炉心の高内部転換性により、同じ増殖比条件におけるブランケット燃料まで含めた実効燃焼度の比較では酸化燃料炉心と同等である。

また、炉心材料の高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) の制限をなくし、照射変形評価式の合理化を前提条件として炉心材料の照射変形量を酸化物燃料炉心並みとした燃料仕様を設定し、炉心部取出平均燃焼度を 150GWd/t にまで増加させた炉心について検討を行った。その結果、酸化物燃料炉心に対して、実効取出燃焼度や運転サイクル長さ等について金属燃料炉心の更なる優位性を見いだすことができた。また、寿命末期の被覆管周方向応力は従来の酸化物燃料における値よりも大幅に増加するが、定常時の燃料健全性は満足できる見通しであることが分かった。逆に、金属燃料炉心で炉心部取出燃焼度 150GWd/t を達成するには、高速中性子照射量 $7 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ 以上 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) においても十分な強度を持つ高性能材料の開発は必須だが、それ以外に、炉心材料の照射変形量の合理化 (酸化物燃料並み)、寿命末期被覆管周方向応力制限目安の合理化 (170MPa 程度) が必要であることが分かった。

表 3.3-1 従来型炉心の柔軟性評価結果

項目 \ 炉心	基準	径ブランケット削除	高燃焼度化	長期運転 サイクル化	酸化物燃料炉心
運転サイクル長さ [ヶ月]	18	18	21	28	18
燃料交換バッチ数	3	3	4	3	4
炉心高さ [cm]	90	90	90	90	80
燃料体積比 [%]	39.4	39.4	39.4	39.4	44.1
Pu富化度 [wt%] (内側/外側炉心)	12.8/17.7	12.9/17.8	13.6/18.7	14.1/18.3	21.7/24.4
Pu-fissile富化度 [wt%]	9.0/12.5	9.1/12.5	9.6/13.2	9.9/12.9	13.3/14.9
燃焼反応度 [%Δk/kk']	0.98	1.31	2.05	3.06	3.20
増殖比	1.23	1.09	1.17	1.15	1.16
(炉心/軸ブラ/径ブラ)	(0.90/0.17/0.16)	(0.91/0.18/-)	(0.84/0.17/0.16)	(0.84/0.17/0.14)	(0.74/0.30/0.12)
最大線出力 [W/cm]	457/463	475/463	450/481	457/485	420/419
最大高速中性子照射量 [$\times 10^{23}$ n/cm ² , En>0.1MeV]	4.8	5.0	7.4	7.7	4.6
取出平均燃焼度 [GWd/t]	47	70	72	72	63
(炉心/軸ブラ/径ブラ)	(98/8.3/4.1)	(101/8.6/-)	(150/15.8/7.8)	(150/15.8/6.8)	(148/-/-)
Naボイド反応度 (EOEC) [%]	7.5	7.5	7.8	8.0	5.8
ドップラー係数 (EOEC) [$\times 10^{-3}$ Δk/kk'/dT]	-4.1	-4.3	-3.6	-3.4	-4.7
炉心等価直径 [cm]	475	475	475	475	490
遮蔽体外径円径 [cm]	638	638	638	638	645
初装荷Pu-フィンペントリ	4.2	4.2	4.4	4.5	4.4
原子炉倍増時間 [年]	20	58	31	35	35
複合システム倍増時間 [年]	32	83	40	45	48

*1: 寿命末期被覆管周方向応力

※β eff: 0.00361 (EOEC)

4. 高出口温度対応金属燃料炉心の概念検討

高出口温度対応金属燃料炉心として、電気出力 750MWe、熱出力 1,785MWt を有する単一 Pu 富化度型中型炉心を対象とし、以下に示すとおり検討を行った。

4.1 高出口温度対応炉心の炉心仕様選定

4.1.1 検討条件

照射変形評価式の合理化を仮定し、高速中性子照射量 $5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1 \text{MeV}$) 相当の照射変形に対して成立する燃料仕様とすることにより、燃料体積比を確保し、炉心核特性に優れた炉心仕様を構築する。以下に示す条件、及び、サーベイ範囲で燃料仕様の設定を行う。

—前提条件—

- ・ラッパー管肉厚：5mm（固定）
- ・外側炉心燃料の圧力損失：一定
- ・集合体間ギャップ：高速中性子照射量 $5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1 \text{MeV}$) の条件でラッパー管同士の相互作用（DDI）が成立するよう、ラッパー管内対面間距離に応じて設定
- ・遮蔽体外接円径：5.5m 以下

—サーベイ範囲—

- ・炉心高さ：90～100cm
- ・集合体当たりピン本数：217、271、331本
- ・燃料ピン径：8.0～8.5mm（直近許認可性を考慮）

4.1.2 検討結果

4.1.2.1 燃料体積比に関するサーベイ

217本、271本、331本ピンの集合体それぞれを用いて炉心を構築した場合の炉心等価直径及び遮蔽体外接円径に対する燃料体積比のパラメータサーベイ結果を図 4.1-1(1)、4.1-1(2)に示す。炉心等価直径をパラメータとした場合には燃料体積比に対する優劣は特に見られない。それに対し、遮蔽体外接円径をパラメータとした場合には、同じ径遮蔽体数条件では、集合体当たりの燃料ピン本数が小さいほど、有利となる結果が見られる。ただし、217本ピン集合体により炉心を構成した場合には、径遮蔽体4層では遮蔽が十分に確保されていない可能性があるため、5層と設定した。その結果、271本ピン集合体が最も燃料体積比を大きく確保できることが分かる。よって、集合体仕様としては271本ピンのものを採用する。

4.1.2.2 ピン径3領域炉心核特性サーベイ

内側炉心、中間炉心、外側炉心の燃料集合体の体数比をそれぞれ20%、30%、50%とし、更に、燃料ピン径比を外側炉心のピン径に対して、内側炉心で93%、中間炉心で95%と固定した場合の、遮蔽体外接円径、及び、炉心高さに対する核特性のパラメータサーベイを行った。サーベイ結果を表4.1-1に示すと共に、増殖比とNaボイド反応度に対するパラメータサーベイ結果の等高線図を図4.1-2(1)と4.1-2(2)にそれぞれ示す。図より、遮蔽体外接円径を540cm程度、炉心高さを94cm程度とした場合に、増殖比が1.03程度、Naボイド

反応度が 8%弱となり、目標を満足できることが分かる。ただし、集合体体数比とピン径比については固定としていたが、実際には調整対象である。内側炉心に対する中間炉心及び外側炉心の最大線出力の比の比較を図 4.1-3 に示すが、3R-③の炉心（遮蔽体外接円径 5.5m、炉心高さ 100cm）については比が 1 近傍であり、出力分布改善の余地はほとんどないが、他の炉心については外側炉心の出力を増加させる必要がある。3R-④の炉心（遮蔽体外接円径 5.3m、炉心高さ 95cm）に対して、中間炉心の最外周 1 層を外側炉心と置き換えたところ、内部転換比及び Na ボイド反応度とも目標を満足することが分かった。よって、この炉心を 3 領域炉心の選定炉心とする。炉心・燃料仕様と主要核特性をそれぞれ表 4.1-2、4.1-3 に示す。

4.1.2.3 ピン径 2 領域炉心核特性サーベイ

4.1.2.2 で選定した 3 領域炉心を基準にして、領域炉心核特性パラメータサーベイを行った。表 4.1-4 はサーベイ炉心仕様とサーベイ結果について示したものである。2R-①は燃料ピン径 3 領域選定炉心の中間炉心燃料を全て内側炉心燃料で置換し、出力分布の調整のために内側炉心のピン径を 7.9mm から 8.0mm に増加させた炉心、2R-②は内側炉心燃料の最外周 39 体を外側炉心燃料で置換し、同じく出力分布調整のために内側炉心のピン径を 8.0mm から 8.1mm に増加させた炉心である。2R-①炉心は燃料ピン径 3 領域選定炉心とほぼ同等の核特性を有している。2R-②炉心は増殖比が目標を上回っていることから、基準炉心として選定されることはないが、炉心領域配分に対する感度として参考となる。2R-②炉心に対して増殖比を目標値付近とするためにコンパクト化を図った炉心が 2R-③である。2R-①と比較して、遮蔽体外接円径が 7cm 小さく核特性上も優れているが、燃料集合体数が少ない分だけ線出力が高く、内側炉心と外側炉心との最大線出力の比の 1 からのずれが大きいことから、熱特性上は不利であると考えられる。よって、2R-①を燃料ピン径 2 領域の基準炉心とする。また、柔軟性評価等において、2R-①炉心では核特性目標を満足できない可能性があるため、核特性向上を目指して、内側炉心と外側炉心の集合体割合をほぼ同じとした、遮蔽体外接円径 5.5m を有する炉心（核特性指向炉心）を設定する。本炉心では、径が 8.3mm の燃料ピンが使用されているが、これは、8.5mm の燃料ピンを用いた場合には炉心がほぼ六角形状になり、核特性上不利になると考えたからである。なお、燃料体積比には両者にほとんど差がないことを確認している。基準炉心及び核特性指向炉心の炉心・燃料仕様と主要核特性をそれぞれ表 4.1-5、4.1-6 に示す。

4.1.2.4 単一ピン径 2 領域炉心核特性サーベイ

単一 Pu 富化度でかつ単一燃料ピン径とすれば、燃料製造設備上は非常に有利となる。そこで、燃料ピン径を 1 種類のみ使用することとし、燃料集合体当たりの燃料ピン本数の違いにより領域区分を行う方式について検討する。集合体当たりの燃料ピン本数の変更には、微調整が可能となるダミーピンの採用が効果的であるとは考えられるが、主に熱水力学的な短所あるいは開発課題が予想されることから、ここでは、集合体内の燃料ピン層数の変更により領域区分を行う。燃料ピン本数をより多く使用する必要のある外側炉心領域の燃料ピンを 10 層（271 本）とし、内側炉心領域の燃料ピンを 9 層（217 本）とする。

パラメータサーベイの条件と解析結果を表 4.1-7 に示す。S-2R-①と S-2R-②はそれぞれ燃料ピン径 2 領域基準炉心、及び、同核特性指向炉心と同じ領域区分とした炉心であるが、双方とも増殖比と Na ボイド反応度双方とも目標を満たしていない。炉心サイズを保ったまま、増殖比の目標を満たすためには、炉心全体の燃料体積比の増加が必要であり、最外周の内側炉心燃料を外側炉心燃料と置換すれば、Na ボイド反応度も含めて目標を満たす見込みである（それぞれ、S-2R-①、S-2R-②炉心）。ただし、外側炉心を拡張したことに伴い、

外側炉心領域のピーク集合体出力が増加し、それに伴う流量増加のためにバンドル部圧力損失が 0.2MPa を超える見込みである。また、出力分布があまり平坦ではないので、高出口温度化の達成は困難であると考えられる。よって、単一ピン径 2 領域炉心に関する検討はこれ以上行わないこととする。

4.1.3 まとめ

有望な高出口温度対応金属燃料炉心として、単一 Pu 富化度でピン径 3 領域炉心及び 2 領域炉心を設定した。次節では、熱的成立性について検討を行うが、ピン径 2 領域炉心に対して高出口温度化の見通しが得られた場合には、燃料製造設備上の観点からより有利であることに基づき、ピン径 2 領域炉心を高出口温度対応中型炉心の基準炉心とする。

表 4.1-1 高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果 -ピン径3領域-

項目 \ 条件	3R-①	3R-②	3R-③	3R-④	3R-⑤
集合体配列ピッチ [mm]	180.7	177.0	171.1	176.8	176.5
燃料及び制御棒集 合体数	337	409	487	409	409
炉心等価直径 [cm]	348	376	396	375	375
遮蔽体外接円径 [cm]	506	530	546	530	529
炉心高さ [cm]	100	100	100	95	90
内側炉心燃料体積 比	0.367	0.382	0.388	0.383	0.384
内側炉心構造材体 積比	0.207	0.213	0.22	0.214	0.215
内側炉心冷却材体 積比	0.426	0.404	0.393	0.403	0.401
内側炉心最大線出 力 [W/cm]	338 (-)*	279 (-)*	227 (-)*	284 (-)*	291 (-)*
中側炉心最大線出 力 [W/cm]	343 (1.01)*	280 (1.00)*	231 (1.02)*	289 (1.02)*	301 (1.03)*
外側炉心最大線出 力 [W/cm]	302 (0.89)*	243 (0.87)*	213 (0.94)*	257 (0.90)*	273 (0.94)*
増殖比	0.995	1.053	1.077	1.022	0.993
Naボイド反応度 [\$]	8.8	8.5	8.2	8.2	7.8

*: 内側炉心に対する最大線出力の比

表 4.1-2 高出口温度対応選定炉心の炉心燃料仕様 —ピン径3領域—

項目	内側炉心	中間炉心	外側炉心
被覆管外径 [mm]	7.9	8.1	8.5
被覆管内径 [mm]	6.98	7.14	7.50
燃料ピン配列ピッチ [mm]	9.7	←	←
燃料ピン本数	271	←	←
ラッパ—管外対面間距離 [mm]	171.3	←	←
ラッパ—管内対面間距離 [mm]	161.3	←	←
集合体配列ピッチ [mm]	176.8	←	←
燃料集合体数	84	75	234
炉心高さ [cm]	950		
炉心等価直径 [cm]	375		
遮蔽体外接円径 [cm]	530		

表 4.1-3 高出口温度対応選定炉心の炉心主要核特性 —ピン径3領域—

項目	特性値
運転サイクル長さ [ヶ月]	24
燃料交換バッチ数	3
Pu富化度 [wt%]*1	12.2
取出平均燃焼度 [GWd/t]	88
燃焼反応度 [%Δk/kk']	0.50
増殖比	1.032
最大線出力 [W/cm]	287
領域間最大線出力の比	1.05
最大高速中性子照射量 [×10 ²³ n/cm ² , E _n >0.1 MeV]	5.1
初装荷核分裂性Pu重量 [t/GWe]	5.2
炉心部ポイド反応度 (EOEC)*2 [%]	8.0

*1: Pu/HM wt%

*2: β_{eff}=0.00352

表 4.1-4 高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果 —ピン径2領域—

項目 \ 条件	2R-①	2R-②	2R-③
内側炉心集合体数 (割合 [%])	159 (40.5)	120 (30.5)	84 (23.1)
外側炉心集合体数 (割合 [%])	234 (59.5)	273 (69.5)	279 (76.9)
炉心燃料集合体数	393	393	363
内側炉心燃料ピン 径 [mm]	8.0	8.1	8.1
外側炉心燃料ピン 径 [mm]	8.5	8.5	8.5
炉心等価直径 [cm]	375	375	365
遮蔽体外接円径 [cm]	530	530	523
増殖比	1.032	1.053	1.041
Naボイド反応度 [\$]	8.0	7.7	7.7
内側炉心最大線出 力 [W/cm]	292 (-)*	300 (-)*	324 (-)*
外側炉心最大線出 力 [W/cm]	284 (0.97)*	308 (1.03)*	343 (1.06)*

*: 内側炉心に対する最大線出力の比

表 4.1-5 高出口温度対応選定炉心の炉心燃料仕様 —ピン径2領域—

項目	燃料ピン径2領域炉心 (H14基準炉心)		燃料ピン径2領域炉心 (核特性向上炉心)	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
被覆管外径 [mm]	8.0	8.5	7.8	8.3
被覆管内径 [mm]	7.06	7.50	6.88	7.32
燃料ピン配列ピッチ [mm]	9.7	9.7	9.4	9.3
燃料ピン本数	271	←	271	←
ラッパー管外対面間距離 [mm]	171.3	←	166.0	←
ラッパー管内対面間距離 [mm]	161.3	←	156.0	←
集合体配列ピッチ [mm]	176.8	←	171.1	←
燃料集合体数	159	234	192	276
炉心高さ [cm]	950		950	
炉心等価直径 [cm]	375		396	
遮蔽体外接円径 [cm]	530		546	

表 4.1-6 高出口温度対応選定炉心の炉心主要核特性 —ピン径2領域—

項目	燃料ピン径2領域炉心 (基準炉心)	燃料ピン径2領域炉心 (核特性向上炉心) ^{*3}
運転サイクル長さ [ヶ月]	24	24
燃料交換バッチ数	3	3
Pu富化度 [wt%] ^{*1}	12.2	12.0
取出平均燃焼度 [GWd/t]	88	75
燃焼反応度 [%Δk/kk]	0.52	0.13
増殖比	1.032	1.056
最大線出力 [W/cm]	292	239
領域間最大線出力の比	0.97	0.94
最大高速中性子照射量 [$\times 10^{23}$ n/cm ² , En>0.1 MeV]	5.3	4.6
初装荷核分裂性Pu重量 [t/GWe]	5.2	5.8
炉心部ポイド反応度 (EOEC) ^{*2} [%]	8.0	7.7

*1: Pu/HM wt% *2: β eff=0.00352

*3: パラメータサーベイ結果からの推測値

表 4.1-7 高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果
 -単一ピン径ピン本数2領域-

項目\条件	S-2R-①	S-2R-①'	S-2R-②	S-2R-②'
内側炉心集合体数 (割合 [%])	159 (40.5)	91 (23.2)	192 (41.0)	155 (33.1)
外側炉心集合体数 (割合 [%])	234 (59.5)	302 (76.8)	276 (59.0)	313 (66.9)
炉心燃料集合体数	393	393	468	468
燃料ピン径 [mm]	8.5	←	8.3	←
内側炉心燃料ピン 本数	217	←	217	←
外側炉心燃料ピン 本数	271	←	271	←
炉心等価直径 [cm]	375	←	396	←
遮蔽体外接円径 [cm]	530	←	546	←
増殖比	0.991	1.03	1.014	1.03
Naボイド反応度 [\$]	8.2	7.6	8.1	7.7
内側炉心最大線出 力 [W/cm]	299 (-)*	-	248 (-)*	-
外側炉心最大線出 力 [W/cm]	288 (0.96)*	-	241 (0.97)*	-
バンドル部圧力損 失見込み [MPa]	0.19	0.23	0.18	0.21

*: 内側炉心に対する最大線出力の比

※条件名に「'」(ダッシュ)が付記されているものは推測値であることを表す。

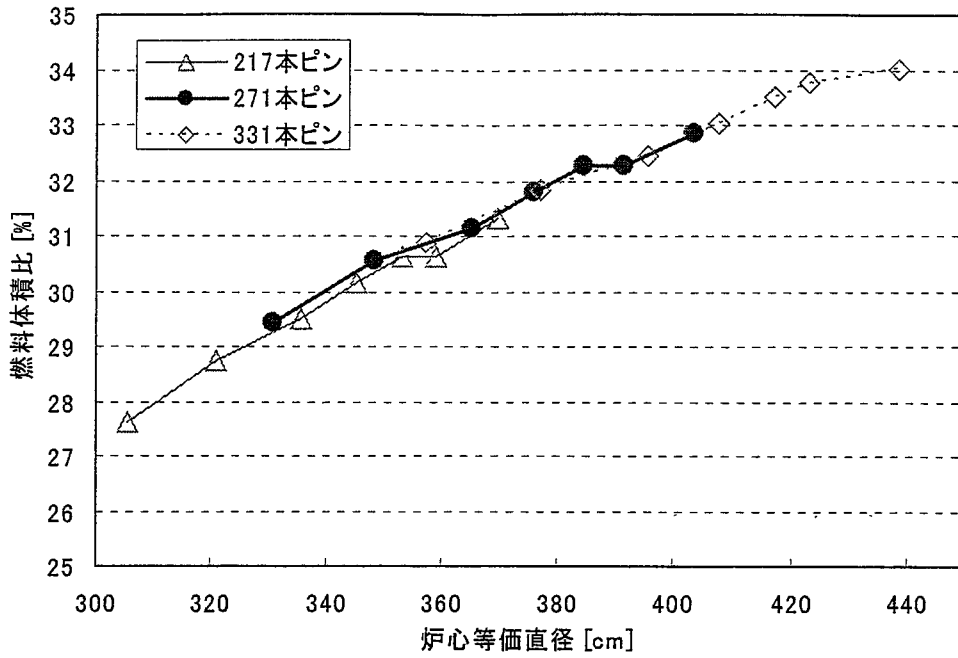


図 4.1-1(1) 高出口温度対応炉心の燃料体積比パラメータサーベイ結果
—炉心等価直径と燃料体積比との関係—

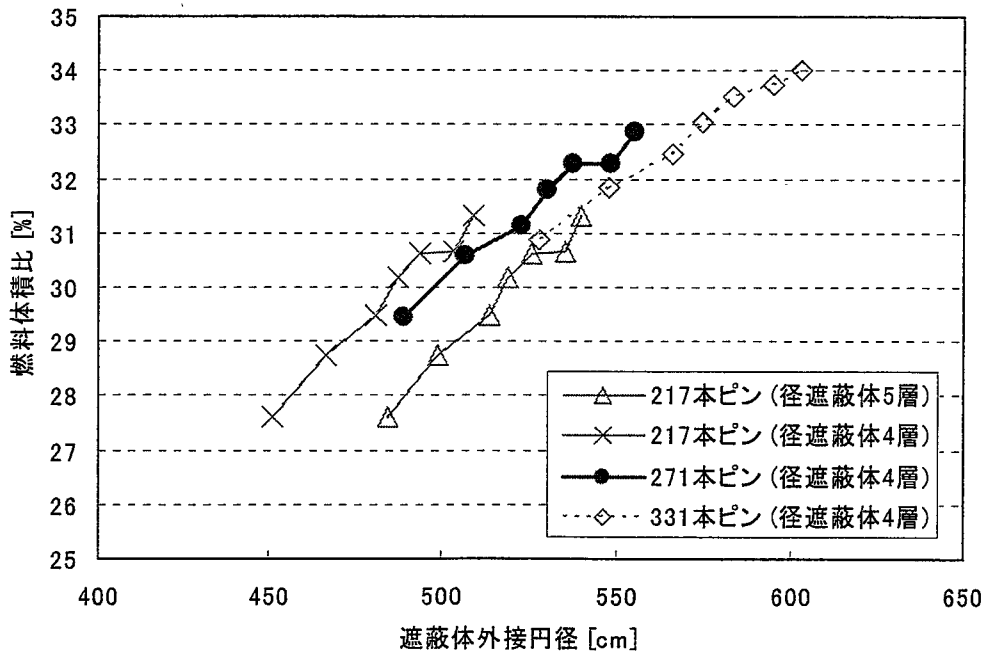


図 4.1-1(2) 高出口温度対応炉心の燃料体積比パラメータサーベイ結果
—遮蔽体外径と燃料体積比との関係—

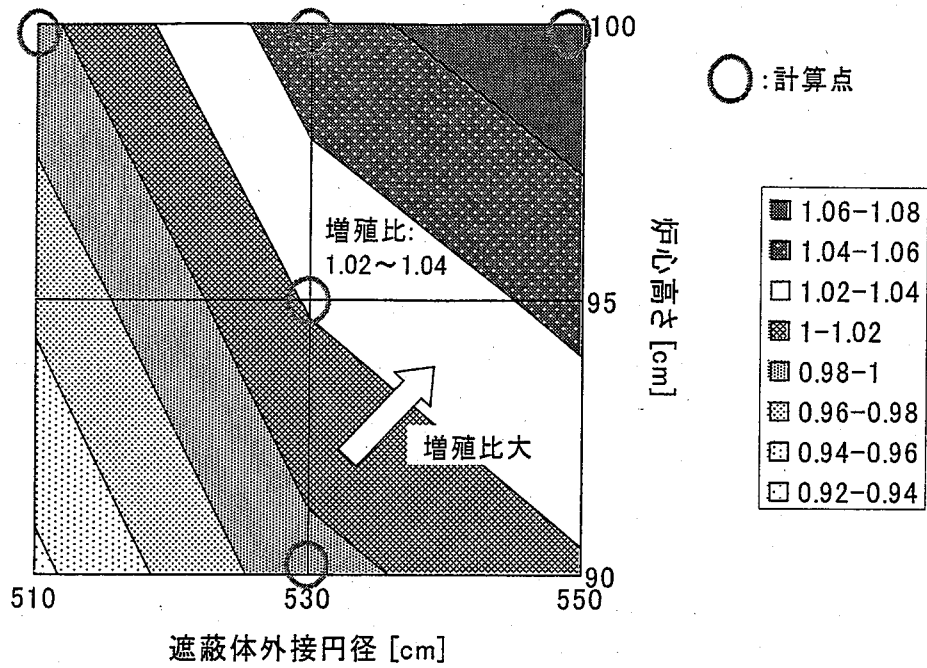


図 4.1-2(1) 高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果
—遮蔽体外接円径及び炉心高さとの関係—

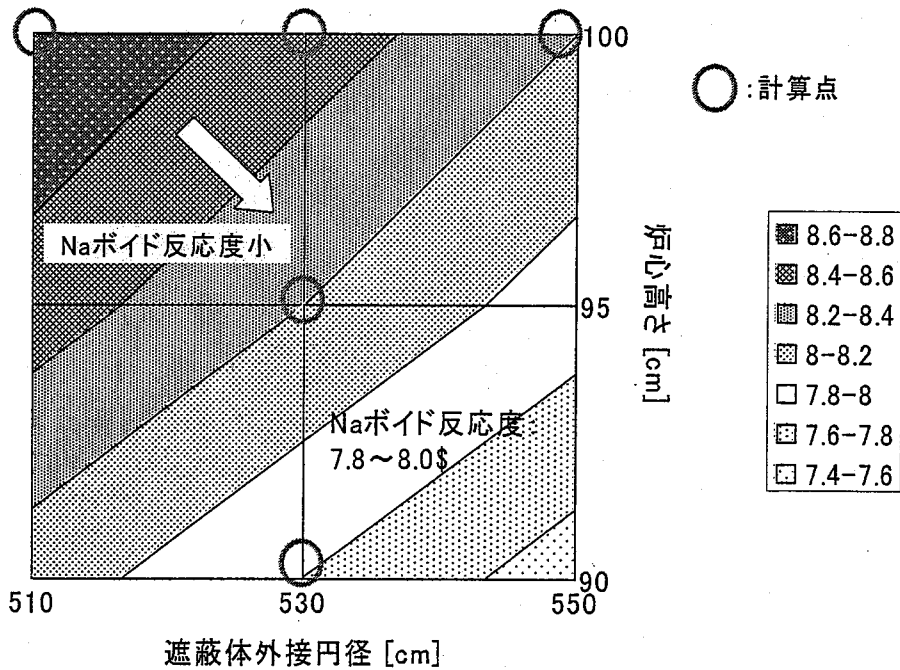


図 4.1-2(2) 高出口温度対応炉心の核特性パラメータサーベイ結果
—遮蔽体外接円径及び炉心高さとの関係—

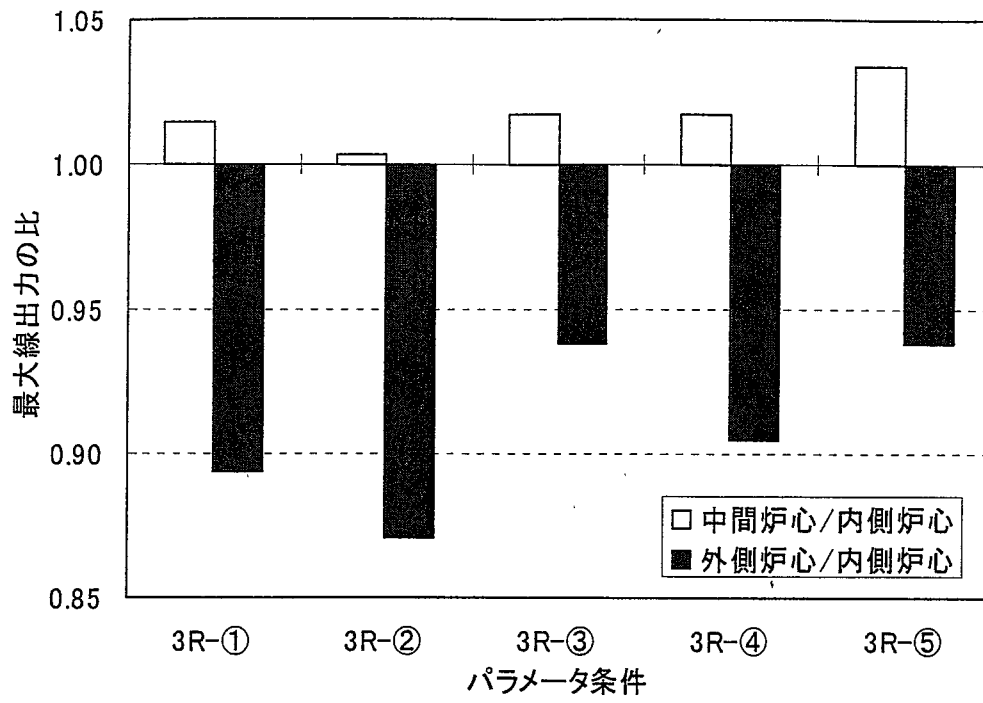


図 4.1-3 高出口温度対応サーベイ対象炉心における最大線出力の比の比較
—燃料ピン径 3 領域—

4.2 高出口温度対応炉心の核・熱特性評価

4.2.1 検討条件

単一 Pu 富化度型ピン径 2 領域炉心の核・熱特性解析を行い、本炉心の高出口温度達成見込みの評価を行う。炉心・燃料仕様を表 4.2-1 に、径方向炉心配置を図 4.2-1 にそれぞれ示す。

4.2.1.1 核特性評価条件

炉定数として、統合炉定数 ADJ2000R を使用した。核特性は基本的には 2 次元 RZ 体系解析に基づく結果であるが、高速中性子照射量 ($E_n > 0.1 \text{MeV}$)、線出力、流量配分用の集合体出力分布については 3 次元体系解析を用いた。Pu 富化度の設定では、燃焼サイクル期間中の最小固有値条件を 0.994 とした。核特性の補正としては、Na ボイド反応度の非均質補正 0.90、ドップラー係数の輸送・メッシュ補正 1.05 をそれぞれ適用した。再処理時に随伴する FP の取り扱いについては、Nd-143 で代表させ、FP 等価係数：1.0 を適用する。

4.2.1.2 熱特性評価条件

核特性評価より得られた集合体出力分布を基に、流量配分計画について評価を行う。液相形成防止の観点から被覆管内面最高温度を 650°C 制限とし、酸化燃料炉心と同等の炉心出入口温度 $395^\circ\text{C}/550^\circ\text{C}$ を目指して流量配分を行う。燃料集合体内の温度分布はサブチャンネル解析により行い、次表に示す工学的安全係数を基にホットスポットファクターを算出し、被覆管のホットスポット温度を求める。炉心燃料への分配可能な流量としては 95% とする。

表 金属燃料炉心解析で用いる工学的安全係数（グリッド型スペーサ）

処理方法	工学的安全因子	ΔT_{Na}	ΔT_{film}	ΔT_{clad}
乗算項	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心熱出力校正誤差		1.02	1.02
	流路変形効果	<u>1.02</u>		
	集合体間流量配分誤差	1.05		
	原子炉出入口温度誤差	1.02		
	ワイヤコンタクト効果		<u>1.00</u>	
統計項 (3σ)	炉内流量配分誤差	1.03		
	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		1.04	1.08

※下線部はワイヤ型スペーサを採用した場合からの相違点を表す。

4.2.2 検討結果

4.2.2.1 核特性評価結果

ピン径 2 領域基準炉心の主要炉心核特性評価結果を表 4.2-2 に示すが、4.1 節の表 4.1-6 との相違は実効遅発中性子割合 β_{eff} の評価見直しに伴う Na ボイド反応度のみである。炉心部取出燃焼度は約 9 万 MWd/t 程度となっている。増殖比、Na ボイド反応度、最大高速中性子照射量 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) 等の核特性は目標を満足している。

平衡炉心の物量収支を表 4.2-3(1)、4.2-3(2)に示す。表より、核分裂性 Pu について、1 サイクル(2 年)当たりの利得は約 40kg であり、燃焼初期全核分裂性 Pu の約 1%分に当たる。

制御反応度収支の評価結果を表 4.2-4(1)に示す。必要反応度の設定根拠と制御棒価値の評価法は 3.2 節に示した通りである。制御反応度収支については停止余裕が十分に確保されており、成立性が見られる。ただし、金属燃料炉心では、燃料のスエリングが燃焼初期において非常に大きいことが知られている。仮にスエリング率を 7%として評価を行ったところ、核特性において次のような結果が得られた。

- ・ Pu 富化度 : +0.4%
- ・ 燃焼反応度 : +0.30% $\Delta k/kk'$
- ・ 増殖比 : -0.017
- ・ Na ボイド反応度 : +0.3%
- ・ BOEC 固有値 : -1.08% Δk (全炉心で -1.10% $\Delta k/kk'$ 、バッチ当たりで -0.4% $\Delta k/kk'$)

また、以上の影響を反映させた制御反応度収支の評価結果を表 4.2-4(2)に示すが、停止余裕が確保されていない、制御棒増設等の設計対応が必要であることが分かる。このように、燃料スエリングは核特性への影響が非常に大きいことが明らかとなり、今後、金属燃料炉心の炉心設計における燃料のスエリングの取り扱いを明確にする必要があると考える。

4.2.2.2 熱特性評価結果

3 次元炉心計算により得られた集合体出力分布を基に、炉心流量配分領域を図 4.2-2 に示すように設定した。設定した流量領域区分に従い、流量配分を行った結果を表 4.2-5 に示す。燃料ピン径 2 領域炉心においても、出入口温度 550/395°C の条件で、被覆管内面最高温度を 650°C 以下とすることができた。なお、バンドル部圧力損失は制限の 0.2MPa を満たしている。

4.2.2.3 まとめ

高速中性子照射量制限 $5.0 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1\text{MeV}$) を満足する高出口温度対応中型金属燃料炉心仕様を設定した。炉心部取出燃焼度については 90GWd/t に制約されるが、ブランケットなしで増殖比目標を達成できるので、同等増殖比を有する酸化物燃料炉心との実効燃焼度についても同等であると考えられる。流量配分の結果、燃料ピン径 2 領域炉心においても出入口温度 550/395°C の達成見通しが得られた。今後は、燃料健全性について評価を行う必要がある。金属燃料のスエリングによる核特性への影響は非常に大きい見込みであり、炉心設計における金属燃料のスエリングの取り扱いを明確にする必要がある。

表 4.2-1 高出口温度対応基準炉心の炉心・燃料仕様

項目	内側炉心	外側炉心
被覆管外径 [mm]	8.0	8.5
被覆管内径 [mm]	7.06	7.50
燃料ピン配列ピッチ [mm]	9.7	9.7
燃料ピン本数	271	←
ラッパ管外対面間距離 [mm]	171.3	←
ラッパ管内対面間距離 [mm]	161.3	←
集合体配列ピッチ [mm]	176.8	←
燃料集合体数	159	234
炉心高さ [cm]	950	
炉心等価直径 [cm]	375	
遮蔽体外接円径 [cm]	530	

表 4.2-2 高出口温度対応基準炉心の主要炉心核特性

項目	特性値
運転サイクル長さ [ヶ月]	24
燃料交換バッチ数	3
Pu富化度 [wt%]*1	12.2
取出平均燃焼度 [GWd/t]	88
燃焼反応度 [%Δk/kk']	0.52
増殖比	1.032
最大線出力*2 [W/cm]	297 (内側炉心), 273 (外側炉心)
領域間最大線出力の比	0.92
最大高速中性子照射量 [$\times 10^{23}n/cm^2$]	5.3 (内側炉心), 4.3 (外側炉心)
初装荷核分裂性Pu重量 [t/GWe]	5.2
炉心部ポイド反応度 (EOEC)*3 [%]	7.8
炉心部ドップラー係数 (EOEC)*4 [$\times 10^{-3}Tdk/dT$]	-3.9

*1: Pu/HM wt%

*2: 3次元体系解析結果

*3: 非均質効果0.90を考慮。β_{eff}=0.00362

*4: 輸送・メッシュ補正1.05を考慮。

表 4.2-3(1) 高出口温度対応基準炉心物量収支 ー1バッチ当たり平衡装荷・取出燃料ー

核種	装荷			取出		
	内側炉心	外側炉心	炉心合計	内側炉心	外側炉心	炉心合計
U-235	14.8	24.6	39.4	4.4	12.1	16.5
U-236	0.0	0.0	0.0	1.9	2.4	4.2
U-238	4,923.4	8,176.9	13,100.3	4,221.1	7,467.4	11,688.5
U合計	4,938.2	8,201.5	13,139.7	4,227.4	7,481.8	11,709.2
Np-237	2.9	4.7	7.6	3.6	5.7	9.3
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	1.7
Np合計	2.9	4.7	7.6	4.4	6.6	11.0
Pu-238	7.8	13.0	20.9	8.0	13.6	21.7
Pu-239	470.3	781.1	1,251.4	478.9	798.4	1,277.3
Pu-240	179.6	298.2	477.8	193.7	310.5	504.2
Pu-241	17.1	28.4	45.5	24.8	35.0	59.7
Pu-242	17.1	28.4	45.5	16.0	26.7	42.7
Pu合計	691.9	1,149.1	1,841.0	721.4	1,184.2	1,905.7
Am-241	11.4	18.9	30.3	8.6	18.0	26.6
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.7	1.0	1.6
Am-243	3.6	5.9	9.5	4.1	6.5	10.5
Am合計	15.0	24.9	39.8	13.3	25.5	38.8
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	1.2
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
Cm-244	2.9	4.7	7.6	3.8	5.6	9.4
Cm-245	0.7	1.2	1.9	0.7	1.1	1.8
Cm合計	3.6	5.9	9.5	5.1	7.5	12.5
合計	5,651.5	9,386.1	15,037.6	4,971.6	8,705.6	13,677.2
FP ^{*1}	18.3	30.4	48.8	18.3	30.4	48.8
FP ^{*2}	0.0	0.0	0.0	681.5	683.3	1,364.8

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 運転中生成FP

表 4.2-3(2) 高出口温度対応基準炉心物量収支 —平衡初期・末期燃料—

核種	平衡初期			平衡末期		
	内側炉心	外側炉心	炉心合計	内側炉心	外側炉心	炉心合計
U-235	31.2	59.1	90.3	20.8	46.6	67.4
U-236	2.6	2.9	5.5	4.4	5.3	9.7
U-238	14,043.3	23,805.3	37,848.6	13,341.0	23,095.8	36,436.8
U合計	14,077.1	23,867.4	37,944.4	13,366.2	23,147.7	36,513.9
Np-237	9.5	15.3	24.8	10.2	16.3	26.5
Np-239	1.8	1.9	3.7	2.7	2.7	5.4
Np合計	11.3	17.2	28.5	12.9	19.1	32.0
Pu-238	23.4	39.2	62.6	23.6	39.8	63.4
Pu-239	1,441.1	2,375.3	3,816.3	1,449.7	2,392.6	3,842.3
Pu-240	554.1	907.4	1,461.4	568.2	919.7	1,487.9
Pu-241	61.2	93.2	154.4	68.9	99.8	168.6
Pu-242	49.7	83.2	132.9	48.6	81.5	130.1
Pu合計	2,129.5	3,498.1	5,627.6	2,159.0	3,533.2	5,692.3
Am-241	30.3	55.3	85.6	27.5	54.4	81.9
Am-242m	1.0	1.3	2.3	1.7	2.3	3.9
Am-243	11.3	18.4	29.7	11.8	18.9	30.7
Am合計	42.6	74.9	117.5	40.9	75.6	116.5
Cm-242	1.2	1.4	2.6	1.8	2.1	3.8
Cm-243	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
Cm-244	9.5	15.1	24.6	10.4	16.0	26.4
Cm-245	2.1	3.4	5.5	2.1	3.4	5.4
Cm合計	12.9	20.0	32.8	14.4	21.5	35.9
合計	16,273.4	27,477.6	43,751.0	15,593.5	26,797.1	42,390.5
FP ^{*1}	55.0	91.3	146.3	55.0	91.3	146.3
FP ^{*2}	683.4	684.0	1,367.4	1,364.9	1,367.3	2,732.2

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 運転中生成FP

表 4.2-4(1) 高出口温度対応基準炉心の制御反応度収支

項目	主系	後備炉停止系	
	1ロッドスタック	1ロッドスタック	全数挿入
1.計画余剰反応度	1.5	0.2	0.4
a)出力補償	0.4	0.2	0.4
b)燃焼補償	0.9		
c)運転余裕	0.2		
2.余剰反応度の不確かさ(2 σ)	0.5	0.1	0.1
a)臨界性予測誤差	0		
b)出力補償予測誤差		0.04	0.06
c)燃料製作公差	0.46		
d)燃料交換余裕	0.2		
3.事故時投入反応度		0.7	0.7
4.最小反応度停止余裕	0.4		
必要制御反応度	2.4	1.0	1.2
制御棒価値	2.7	1.8	2.2
反応度停止余裕	0.3	0.8	1.0

単位:% Δ k/kk'

表 4.2-4(2) 高出口温度対応基準炉心の制御反応度収支 (燃料スエリングを考慮)

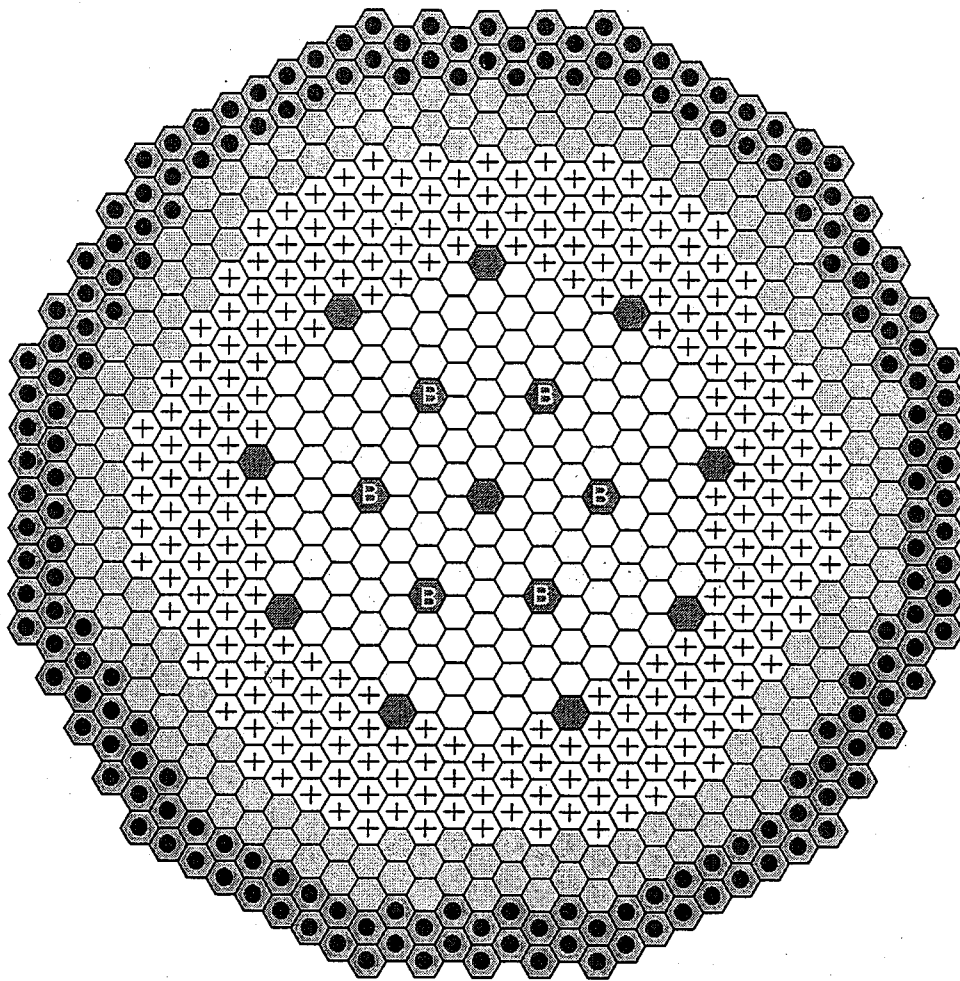
項目	主系	後備炉停止系	
	1ロッドスタック	1ロッドスタック	全数挿入
1.計画余剰反応度	2.2	0.2	0.4
a)出力補償	0.4	0.2	0.4
b)燃焼補償	1.2		
c)運転余裕	0.2		
d)燃料スエリング補償	0.4		
2.余剰反応度の不確かさ(2 σ)	0.5	0.1	0.1
a)臨界性予測誤差	0		
b)出力補償予測誤差		0.04	0.06
c)燃料製作公差	0.46		
d)燃料交換余裕	0.2		
3.事故時投入反応度		0.7	0.7
4.最小反応度停止余裕	0.4		
必要制御反応度	3.1	1.0	1.2
制御棒価値	2.7	1.8	2.2
反応度停止余裕	-0.4	0.8	1.0

単位:% Δ k/kk'

表 4.2-5 高出口温度対応基準炉心の流量配分結果

炉心領域	領域番号	集集体数	集集体最大出力		集集体流量 [kg/s]	必要領域流量 [kg/s]	被覆管最高温度 [°C]	圧力損失 [MPa]
			[MW]	[kg/s]				
内側炉心	1	81	6.26	26.2	2122.2	0.09	648	0.09
	2	78	5.75	24.3	1895.4	0.08	648	0.08
	3	78	5.60	25.4	1981.2	0.17	648	0.17
外側炉心	4	60	4.29	20.1	1206.0	0.11	649	0.11
	5	48	3.31	16.3	782.4	0.08	648	0.08
	6	48	2.53	13.3	638.4	0.05	648	0.05
合計	—	393	—	—	8625.6	—	—	—
			炉心流量 ^{*1} [kg/s]		8639			
			余剰流量 [kg/s]		+13.4			

*1: 全炉心流量の内、95%を燃料集集体冷却用に配分









- | | |
|--|--|
|  内側炉心燃料集合体 (159体) |  B ₄ C遮蔽体 (186体) |
|  外側炉心燃料集合体 (234体) |  主系制御棒 (10体) |
|  ステンレス鋼反射体 (162体) |  後備系制御棒 (6体) |

図 4.2-1 高出口温度対応基準炉心の径方向炉心配置図

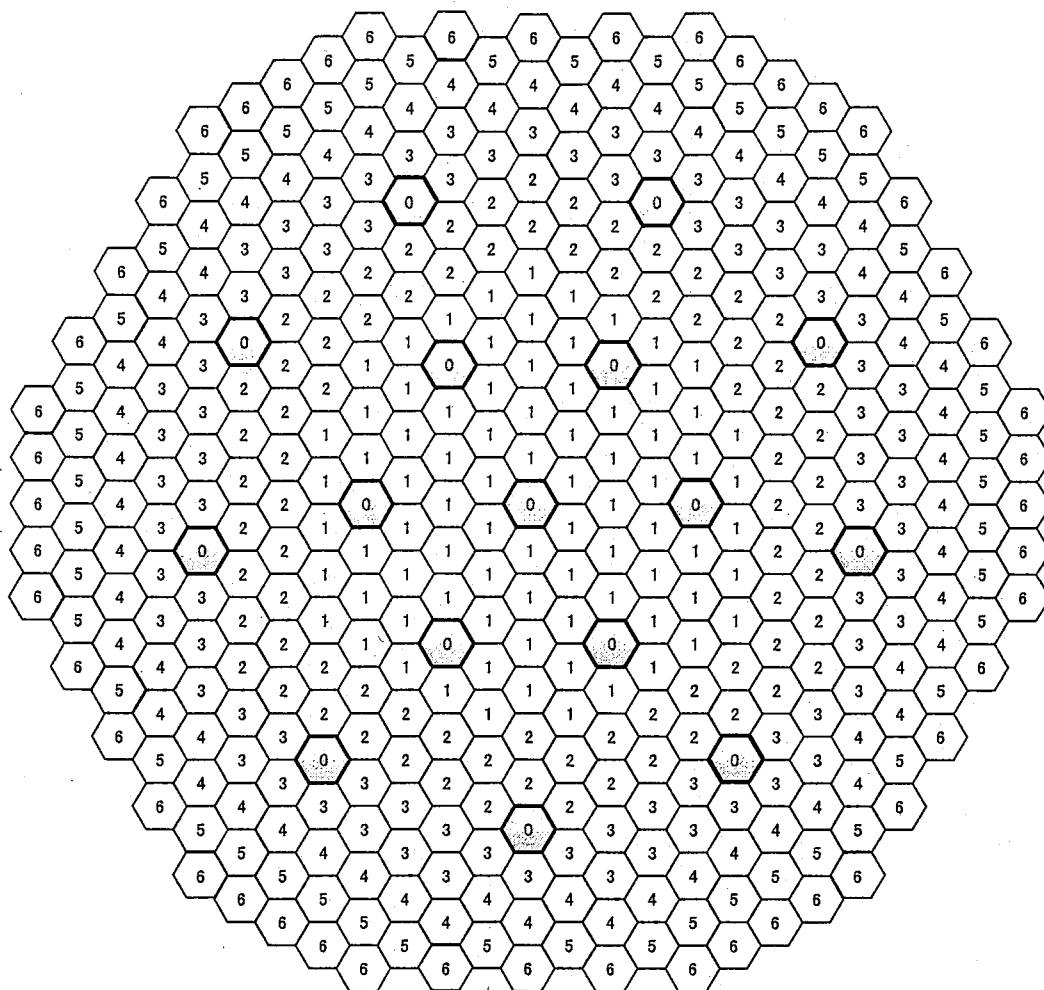


図 4.2-2 高出口温度対応基準炉心の流量配分領域図

4.3 高出口温度対応炉心の柔軟性評価

金属燃料炉心の魅力を追求するために、高速中性子照射量制限 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) の合理化を前提とした高燃焼度化に関する検討や、FBR 導入期に求められる高増殖要求に対する柔軟性評価を行った。

検討結果を表 4.3-1 にまとめる。以下、個別の柔軟性評価結果について述べる。

4.3.1 高燃焼度化への柔軟性

(表 4.3-1 の「高燃焼度化」、「変則バッチ導入」の列を参照)

基準炉心仕様では、目標とする増殖比 1.03 が得られなかったため、核特性向上炉心 (径方向炉心配置は図 4.3-1 の通り) を基本仕様として検討を行った。まず、軸ブランケットを付加しなかった場合であるが、増殖比目標と Na ボイド反応度目標を同時に満たす炉心を構築することはできなかった。そこで、Na ボイド反応度の目標を満足させるために炉心高さを 5cm 低下させ、かつ、上部軸ブランケットを 15cm 付加することにより、目標を満たす炉心を構築することができた。なお、高速中性子照射量は $8 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ ($E_n > 0.1\text{MeV}$) に達し、制限値 $5 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$ を大きく上回っている。

次に、高速中性子照射量制限 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) を満足した上で、燃料交換の運用による高燃焼度化の効果について評価を行うために、変則バッチの導入について検討を行った。その結果、取出燃焼度は 90GWd/t から 110GWd/t にまで向上できることが分かった。

高燃焼度化させた場合の魅力追求に関する検討として、高出口温度対応化についても今後検討を行うことが望ましいと考える。

4.3.2 長期運転サイクル化への柔軟性

(表 4.3-1 の「長期運転サイクル化」の列を参照)

4.3.1 で設定した高燃焼度化炉心について、制御反応度収支成立性については考慮しないこととし、長期運転サイクル化のポテンシャルを評価するための検討を行った。その結果、酸化燃料炉心と同程度の燃焼反応度とした場合には、60 ヶ月の長期運転サイクル実現のポテンシャルを有していることが確認できた。

4.3.3 増殖比要求への柔軟性

(表 4.3-1 の「中増殖」、「高増殖」の列を参照)

上部軸ブランケットの高さ調整による増殖比要求への柔軟性評価を行った。増殖比要求として、1.1 及び 1.2 の場合を想定した。Na ボイド反応度の目標を満足させるために炉心高さを 90cm としたが、評価の結果、それぞれの増殖比要求に対し、上部軸ブランケットを 20cm、50cm とすることにより対応可能であることが分かった。また、バンドル部圧力損失については制限の 0.2MPa を満足できる見通しである。

表 4.3-1 高出口温度対応炉心の柔軟性評価結果

項目 \ 炉心	基準	高燃焼度化	変則バッチ導入	長期運転 サイクル化	中増殖	高増殖
運転サイクル長さ [ヶ月]	24	23	20	60	24	24
燃料交換バッチ数	3	4	変則バッチ(4~13)	2	3	3
炉心高さ [cm]	95	90	95	90	90	90
上部軸フランケット高さ [cm]	0	15	0	15	20	50
平均燃料体積比 [%]	42.2	42.8	42.8	42.8	42.2	42.2
Pu 富化度 [wt%]	12.2	12.9	12.0	13.1	12.3	12.3
Pu-fissile 富化度 [wt%]	8.6	9.1	8.5	9.2	8.7	8.7
燃焼反応度 [%Δk/kk']	0.52	1.23	0.25	3.29	0.34	0.38
増殖比	1.032	1.030	1.033	1.033	1.117	1.182
(炉心/軸ブラ)	(1.032/-)	(0.941/0.089)	(1.033/-)	(0.945/0.088)	(1.006/0.111)	(1.006/0.175)
最大線出力 [W/cm]	297	238	251	244	304	304
最大高速中性子照射量	5.3	8.4	5.3	7.3	5.4	5.4
[$\times 10^{23}$ n/cm ² En>0.1MeV]	88	134	110	117	75	59
取出平均燃焼度 [GWd/t]	(↑)	(152/28)	(↑)	(133/22)	(89/10)	(89/5)
(炉心/上部軸ブラ)	7.8	8.0	7.7	8.0	8.0	8.0
Naボイド反応度 (EOEC) [%]	-3.9	-	-	-	-	-
ドップラー係数 (EOEC)	[$\times 10^{-3}$ Tdk/kk'/dT]	-	-	-	-	-
炉心等価直径 [cm]	375	396	396	396	375	375
遮蔽体外接円径 [cm]	530	546	546	546	530	530
初装荷Pu-フィンペントリ	5.2	5.9	5.7	6.0	4.9	4.9

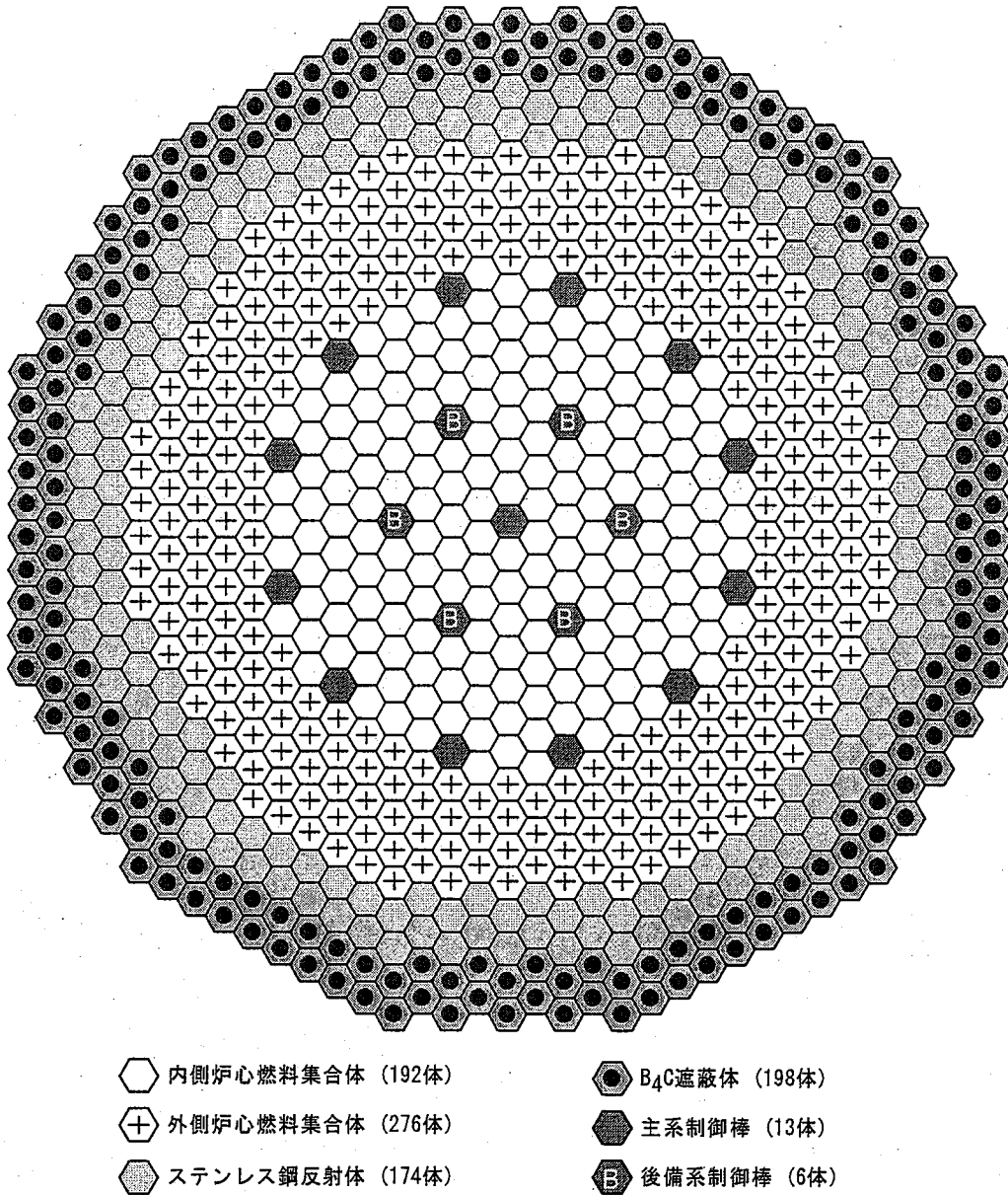


図 4.3-1 高出口温度対応基準炉心の径方向炉心配置図 (核特性向上炉心)

5. おわりに

これまでの実用化戦略調査研究における検討結果を踏まえて、核特性向上を目指した従来型均質 2 領域金属燃料炉心を構築し、酸化物燃料炉心との炉心性能の比較を行った。また、金属燃料炉心特有の炉心特性を十分に生かし、かつ、酸化物燃料炉心と同等の出口温度を有する魅力ある高出口温度対応金属燃料炉心概念を構築した。

従来型炉心としては、酸化物燃料互換性を想定した大型 2 領域 Pu 富化度型炉心を対象とし、高出口温度対応炉心に関しては、中型単一 Pu 富化度型炉心を対象にそれぞれ検討を実施した。具体的には、燃料体積比を出来るだけ高めるための燃料仕様を設定し、酸化物燃料炉心に対する、増殖性、長期運転サイクル等の魅力を追求した。また、FBR 本格運用期に対し、FBR 導入期における燃料増殖要求に対する柔軟性の評価を行った。更に、CDA 時の炉心燃料流出を促進し、再臨界回避を目指したブランケット燃料仕様（下部軸ブランケット削除）とした。なお、高出口温度対応炉心の検討では、直近許認可性を考慮し、燃料ピン径を 8.5mm 程度以下とし、ピン径領域数及び集合体当たりピン本数を調整した種々の炉心の検討を行った。

従来型均質 2 領域炉心に関する検討の結果、次のことが分かった。

- ・炉心材料の高速中性子照射量制限 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) を炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t の酸化物燃料炉心並み ($5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$) とした炉心・燃料仕様では、より高い増殖性やより長い運転サイクル性といった金属燃料炉心特有の性能を十分に引出せるが、炉心部取出平均燃焼度は 100GWd/t 程度に制約される。ただし、ブランケットも含めた実効燃焼度については酸化物燃料炉心と同等である。液相形成防止の観点から被覆管内面最高温度 650°C の条件において流量配分を行った結果、酸化物燃料炉心と同様に内側炉心 4 領域、外側炉心 4 領域として、炉心出口/入口温度は 506/352°C となる見通しである。
- ・炉心部取出平均燃焼度 100GWd/t 炉心の炉心特性を維持しつつ炉心部取出平均燃焼度を 150GWd/t に延長させるためには、炉心材料の照射変形量を酸化物燃料炉心並みに合理化させる必要がある。また、最大高速中性子照射量は $7 \sim 8 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ ($E_n > 0.1\text{MeV}$) に及ぶ。寿命末期の被覆管周方向応力は従来の酸化物燃料における値よりも大幅に増加するが、定常時の燃料健全性は満足できる見通しである。更に、酸化物燃料炉心と同程度の燃焼反応度とした場合には、28 ヶ月運転サイクル（酸化物燃料炉心 18 ヶ月運転サイクル）とすることが可能であるとの見通しが得られた。

高出口温度対応炉心に関する検討の結果、次のことが分かった。

- ・中型炉心を対象とし、直近許認可性より最大ピン径を 8.5mm に制限し、燃料製造性向上の観点からピン径を従来の 3 領域から 2 領域とした炉心・燃料仕様としても、被覆管内面最高温度 650°C の条件において、炉心出口/入口温度を酸化物燃料炉心と同等の 550/395°C とできる見通しである。
- ・金属燃料炉心の高内部転換性を生かし、増殖比目標 1.0 程度から 1.2 に対して、径ブランケットあるいは下部ブランケットの付加は不要であり、上部軸ブランケット長さの調整のみで対応可能である。
- ・高速中性子照射量制限 ($E_n > 0.1\text{MeV}$) を酸化物燃料炉心並みとした炉心・燃料仕様では、取出平均燃焼度は 90GWd/t 程度に制約される。ただし、変則バッチの導入により取出燃焼度は 110GWd/t まで高めることが可能である。
- ・炉心材料の照射変形量合理化の仮定の下、高燃焼度化炉心について検討した結果、取出平均燃焼度 90GWd/t の炉心の核特性をほぼ保つことが可能である。また、60 ヶ月運転の長期運転サイクル性のポテンシャルを有する。

今後の課題として、金属燃料炉心に対する核特性補正值の評価と適用、高出口温度対応炉心概念の大型炉に対する成立性検討、大型炉心に対する制御棒配置の合理化、燃料スエリングの考慮あるいは設計における取り扱いの明確化が挙げられる。

6. 謝辞

本研究における「従来型金属燃料炉心」の検討は筆者の検討方針などを取り込んで三菱重工業(株)殿に担当して頂き、「高出口温度対応金属燃料炉心」の検討は(株)日立製作所殿に担当して頂きました。いずれも、短期間での厳しい工程の中、効率よく検討して頂き、十分な成果を報告して頂きました。ここに感謝の意を表します。