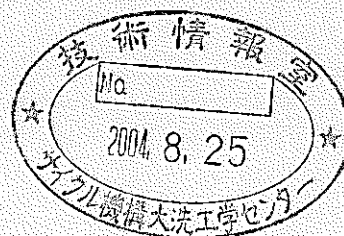


# ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討

—2003年度金属燃料炉心の検討—

(研究報告)

2004年5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)  
2004

## ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討

## —2003年度金属燃料炉心の検討—

## (研究報告)

杉野和輝\*1、小川隆\*1、  
永沼正行\*1、高木直行\*2

## 要 旨

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、MOX 燃料と比較して高い増殖性能や燃料インベントリの低減が期待できる金属燃料炉心を取り上げ、大型（電気出力 1,500MWe）及び中型（750MWe）のナトリウム冷却金属燃料コンパクト型炉心及び高出口温度型炉心の概念を構築した。

ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心と同等の原子炉出入口温度（550°C/395°C）を目指した高出口温度型炉心の構築においては、新しい出力分布平坦化方策として、従来のピン径の多段階化による方法から、ピン径を単一として燃料の Zr 含有率を多段階化する方法を適用した。その結果、ナトリウムボイド反応度を大幅に低減でき、それに伴う設計範囲の拡大を炉心のコンパクト化に充てることができた。

熱特性解析として、原子炉出口/入口温度 550/395°C の条件で開発課題の少ないワイヤ型スペーサの適用を想定して冷却材流量配分計画を策定した。その結果、被覆管内面最高温度について、中型炉心では 659°C、大型炉心では 655°C といずれも制限の 650°C を超過する結果となったが、工学的安全係数の合理化等により満足できる範囲内であると考えられる。

他方、コンパクト型炉心の構築においては、ナトリウムボイド反応度の非均質効果等の改訂を反映させて、2002 年度炉心に構築した炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を達成する高燃焼度化炉心に対して見直しを図った。

以上示した炉心は、実用化戦略調査研究フェーズ II 中間まとめに向けて構築した炉心であり、総合評価等の幅広い視点からの検討により、ナトリウム冷却金属燃料炉心概念の相対的ポテンシャルや課題等が明らかになるものと期待できる。

---

\*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

本報告書の一部は、「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 JFY2003—

Kazuteru SUGINO\*<sup>1</sup>, Takashi OGAWA\*<sup>1</sup>,  
Masayuki NAGANUMA\*<sup>1</sup>, Naoyuki TAKAKI\*<sup>2</sup>

Abstract

For the requirement of superior economics and safety in the future commercial FBR period, metal fuel cores have been investigated, that have advantage of higher breeding capability and lower fuel inventory compared with oxide fuel cores. In this study, attractive concepts of large-size (electric output of 1,500MWe) and middle-size (750MWe) sodium cooled metal fuel core of compact type and high outlet temperature type have been constructed.

In the construction of high outlet temperature type cores which are aimed at achieving the identical core outlet and inlet temperatures to those of sodium cooled oxide fuel cores (550°C/395°C), a new measure for flattening the radial power distribution has been adopted. In the new measure, the fuel pin-diameter is unified and the levels of Zr-contents of metal fuel are changed in the radial direction instead of changing the fuel pin-diameters as applied in the former study. This new measure enables the reduction of sodium void reactivity and enlargement of core design window, and that resulted in the compactness of cores.

The core flow distribution design has been performed by thermal hydraulic analysis under the condition of outlet/inlet temperatures of 550/395°C with adoption of the wire-type spacer because of its less development issues. The results of maximum cladding temperatures were 659°C for middle-size core and 655°C for large-size core, and exceeded the limitation of 650°C. However the measures such as the rationalization of hot spot factor can reduce the maximum cladding temperature to 650°C.

In the construction of compact type cores, some modifications were performed to the high burnup core with core averaged discharge burnup of 150GWd/t which has been settled in JFY 2002.

Above mentioned cores were constructed for the interim summary of the feasibility study on commercialized fast reactor cycle systems phase II. Investigations in various fields such as synthesis evaluation is expected to clarify the relative potential and future issues of sodium cooled metal fuel core concept.

---

\*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)

A part of 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.....	3
2.1 金属燃料炉心の設計条件と設計目標.....	3
2.2 金属燃料炉心の検討フロー.....	4
3. コンパクト型炉心の概念検討.....	12
3.1 検討条件.....	12
3.2 検討結果.....	13
3.2.1 大型炉心.....	13
3.2.2 中型炉心.....	15
3.3 まとめ.....	16
4. 高出口温度型炉心の概念検討.....	50
4.1 検討条件.....	50
4.2 検討結果.....	51
4.2.1 中型炉心.....	51
4.2.2 大型炉心.....	53
4.3 まとめ.....	54
5. 技術的成立性の評価と今後の課題.....	86
5.1 技術的成立性の評価.....	86
5.2 今後の課題.....	89
6. おわりに.....	101
7. 謝辞.....	102
8. 参考文献.....	103
付録 A. 金属燃料設計制限因子.....	104

## 表リスト

表 2.1-1	コンパクト型炉心の主要な設計条件	5
表 2.1-2	高出口温度型炉心の主要な設計条件	6
表 3.2-1	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)	18
表 3.2-1	大型コンパクト型炉心の炉心・燃料仕様サーベイ結果	19
表 3.2-2	大型コンパクト型炉心の主要燃料仕様	20
表 3.2-3	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の主要炉心核特性	21
表 3.2-4(1)	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -1 バッチ当たり平衡装荷燃料-	22
表 3.2-4(2)	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -1 バッチ当たり平衡取出燃料-	22
表 3.2-4(3)	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -平衡初期燃料-	23
表 3.2-4(4)	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -平衡末期燃料-	23
表 3.2-5	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の制御反応度収支	24
表 3.2-6	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の流量配分結果	25
表 3.2-7	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) における領域内最大出力燃料要素の出力履歴	25
表 3.2-8	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) 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	26
表 3.2-9	大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力	26
表 3.2-10	大型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性	27
表 3.2-11	大型コンパクト型導入期炉心の主要核特性	28
表 3.2-12	大型コンパクト型炉心の TRU 組成変動による炉心特性の比較 (高燃焼度化導入期炉心)	29
表 3.2-13	中型コンパクト型炉心の主要燃料仕様	30
表 3.2-14	中型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の主要炉心核特性	31
表 3.2-15(1)	中型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -1 バッチ当たり平衡装荷燃料-	32
表 3.2-15(2)	中型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -1 バッチ当たり平衡取出燃料-	32
表 3.2-15(3)	中型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -平衡初期燃料-	33
表 3.2-15(4)	中型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の物量収支 -平衡末期燃料-	

.....	33
表 3.2-16 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の制御反応度収支 .....	34
表 3.2-17 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の流量配分結果 .....	35
表 3.2-18 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）における領域内最大出力燃料要素の出力履歴 .....	36
表 3.2-19 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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 .....	37
表 3.2-20 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力 .....	38
表 3.2-21 中型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性 .....	39
表 3.2-22 中型コンパクト型導入期炉心の主要核特性 .....	40
表 3.2-23 中型コンパクト型炉心の TRU 組成変動による炉心特性の比較（高燃焼度化導入期炉心） .....	41
表 4.2-1 中型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様基本サーベイ結果 .....	56
表 4.2-2(1) 中型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様詳細サーベイ結果 -増殖比-	57
表 4.2-2(2) 中型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様詳細サーベイ結果 -規格化包絡熱出力-	57
表 4.2-3 中型高出口温度型炉心の主要燃料仕様 .....	58
表 4.2-4 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の主要炉心核特性 .....	59
表 4.2-5(1) 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支 -1バッチ当たり平衡装荷及び取出燃料-	60
表 4.2-5(2) 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支 -平衡初期及び末期燃料-	61
表 4.2-6 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の制御反応度収支 .....	62
表 4.2-7 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の流量配分結果 .....	63
表 4.2-8 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）における領域内最大出力燃料要素の出力履歴 ..	64
表 4.2-9 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）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 .....	64
表 4.2-10 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力 .....	65
表 4.2-11 中型高出口温度型導入期炉心の主要核特性 .....	66
表 4.2-12 中型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性 .....	67
表 4.2-13 大型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様基本サーベイ結果 .....	68
表 4.2-14 大型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様詳細サーベイ結果 .....	68
表 4.2-15 大型高出口温度型炉心の主要燃料仕様 .....	69
表 4.2-16 大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の主要炉心核特性 .....	70
表 4.2-17(1) 大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支 -1バッチ当たり平衡装荷及び取出燃料-	71

表 4.2-17(2)	大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支　－平衡初期及び末期燃料－	72
表 4.2-18	大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の制御反応度収支	73
表 4.2-19	大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の流量配分結果	74
表 4.2-20	大型高出口温度型導入期炉心の主要核特性	75
表 4.2-21	大型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性	76
表 5.1-1	金属燃料の照射実績（IFR プログラム、定常照射）	91
表 5.1-2	ODS 代替被覆材の特性・開発見通し	92
表 5.1-3	グリッドスペーサとワイヤスペーサの特徴の比較	93
表 5.1-4	Zr-H 遮へい体温度評価結果	93
表 5.1-5	大型金属燃料コンパクト型炉心の制御棒仕様	94
表 5.1-6	大型金属燃料コンパクト型炉心の制御棒 ACMI（吸収材ペレット-被覆管相互作用）概略評価結果	95



## 図リスト

図 2.1-1	燃焼期間中の径方向出力分布変動の比較	7
図 2.1-2	燃焼期間中の径方向最大出力分布の比較	7
図 2.2-1(1)	コンパクト型炉心の検討スキーム —大型炉心—	8
図 2.2-1(2)	コンパクト型炉心の検討スキーム —中型炉心—	9
図 2.2-2(1)	高出口温度型炉心の検討スキーム —中型炉心—	10
図 2.2-2(2)	高出口温度型炉心の検討スキーム —大型炉心—	11
図 3.2-1	大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の配置図	42
図 3.2-2	大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の流量配分領域図	43
図 3.2-3	大型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の配置図	44
図 3.2-4	大型コンパクト型導入期炉心の配置図	45
図 3.2-5	中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の炉心配置図	46
図 3.2-6	中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の流量配分領域図	47
図 3.2-7	中型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の炉心配置図	48
図 3.2-8	中型コンパクト型導入期炉心の炉心配置図	49
図 4.2-1	中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の炉心配置図	77
図 4.2-2	中型高出口温度基準炉心（平衡期炉心）の流量配分領域図	78
図 4.2-3	中型高出口温度型導入期炉心の炉心配置図	79
図 4.2-4	中型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の炉心配置図	80
図 4.2-5	大型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様サーベイ結果	81
図 4.2-6	大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の炉心配置図	82
図 4.2-7	大型高出口温度基準炉心（平衡期炉心）の流量配分領域図	83
図 4.2-8	大型高出口温度型導入期炉心の炉心配置図	84
図 4.2-9	大型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の炉心配置図	85
図 5.1-1	ODS 鋼のクリープ強度評価式から求めた被覆管周方向応力と破損温度の関係	96
図 5.1-2	金属燃料の照射実績および実用化戦略調査研究炉心におけるターゲット	96
図 5.1-3	MABLE 型集合体の構造	97
図 5.1-4	Zr-H 水素解離割合	98
図 5.1-5	被覆管水素透過率の比較	99
図 5.1-6	Zr-H 遮へい体構造概念図	100

図 A-1	中燃焼度(約 5 at%)燃料における液相含有領域面積割合 .....	106
図 A-2	高燃焼度(約 10 at%)燃料における液相含有領域面積割合 .....	106
図 A-3	金属燃料の被覆管内面腐食評価式と測定結果の比較 .....	107
図 A-4	ODS 鋼のクリープ強度評価式から求めた被覆管周方向応力と破損温度の関係 .....	107

## 1. はじめに

1999年7月より、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）と日本原子力発電株式会社（以下、原電）を中心に日本国内において、国内の一元的な体制で高速増殖炉（FBR）システムと燃料サイクルシステムの整合が図られたFBRサイクルシステムの実用化戦略を明確にする上で必要となる判断基準を整備して、軽水炉サイクルと比肩する経済性を達成しうる実用化概念の構築及び実用化に向けた研究開発計画の策定を行うため、実用化戦略調査研究（F/S）を開始した。

F/Sでは、FBR、再処理及び燃料製造の各システムについて、これまでに国内外で蓄積された研究開発の成果を活用するとともに、技術革新を採用した幅広い技術的選択肢の評価を行い、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性及び核拡散抵抗性の5つの開発目標に適合する有望なFBRサイクルの実用化概念を抽出することとしている。

本研究は、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、MOX燃料と比較して高い増殖性能や燃料インベントリの低減が期待でき、F/Sにおける有望概念の一つとされている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を有するナトリウム冷却金属燃料コンパクト型及び高出口温度型の概念を設定することを目的とする。

これまで、F/Sにおける炉心設計研究では、冷却材ボイド反応度の非均質効果として、ナトリウム冷却MOX燃料炉心の値が適用されてきており、2002年度に構築した大型金属燃料炉心についても同様の取り扱いとしていた。他方、ナトリウム冷却金属燃料炉心に関する核特性の詳細評価も進行しており、MOX燃料炉心よりも中性子スペクトルの硬い金属燃料炉心に対して非均質性はより小さいとの結果が得られており、MOX燃料炉心の非均質効果の適用は非保守側の評価となることが分かっている。そこで、金属燃料炉心のナトリウムボイド反応度の非均質効果の適用に伴い、コンパクト型炉心（コンパクト化を図り早期導入性を高めたPu富化度2領域型炉心）の仕様について見直しを行った。

また、革新的な炉心概念の検討として、高出口温度型金属燃料炉心の検討を行っている。この概念は、ロシアのBREST炉心概念（鉛冷却窒化物燃料炉心）の特徴である重金属密度が高いこと、ピン径による多領域型炉心であること、単一Pu富化度であること、といった基本仕様をナトリウム冷却金属燃料炉心へ応用したものである。2002年度は、中型炉心の概念検討を行っており、ブランケットなしで増殖比1.03を達成できることが分かった。また、グリッド型スペーサを適用することにより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。

しかしながら、ピン径多領域型炉心は、炉心内側ほどピン径を細くしているために、冷却材体積比が増加する傾向にあり、ナトリウムボイド反応度を適度に抑制する観点から設計範囲が狭小であるとの弱点がある。ピン径が多領域であることは、燃料スラグ、被覆管、グリッド型スペーサも複数種類製造する必要があることを意味し、単一ピン径を想定している燃料製造側への影響も多大であることが懸念される。更に、ナトリウム冷却炉用のグリッド型スペーサについては、国内における製造及び使用実績がないことから、開発課題の問題もある。

上記の問題を克服する方法として、ピン径の代わりに金属燃料スラグのZr含有率を多領域とする炉心概念：単一ピン径Zr含有率多領域型炉心概念を提案する。すなわち、単一Pu富化度の特徴は維持し、出力分布平坦化のための重金属密度の段階化の手段として、燃料スラグのZr含有率を炉心内側へ行くに従い高くする方法である。この方策では、ピン径が1種類となるので、冷却材体積比は径方向に一様となり、ナトリウムボイド反応度の低減につながり、燃料製造性も従来のPu富化度多領域型炉心と同等となることが期待できる。更

に、ピン間ギャップが縮小するためにワイヤ型スペーサの適用も容易となり、開発課題の縮小につながると考えられる。

よって、2003年度は Zr 含有率の多領域化による高出口温度型炉心を構築し、炉心性能の向上を図ることとする。

以上示したコンパクト型炉心及び高出口温度型炉心について、F/S フェーズ II 中間まとめ(Ⅱ)に向けて、金属燃料炉心概念のデータベースをそろえる目的から、出力規模（大型炉と中型炉）、FBR 導入シナリオを想定した増殖性能（導入期炉心と平衡期炉心）、経済性向上を目指した高燃焼度化に関する評価も行った。

なお、本報告書では、特に断らない限りは、高速中性子照射量設計目標目安を満足する炉心であることを意味し、炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を満足する炉心について高燃焼度化炉心と称することとする。

## 2. 金属燃料炉心の炉心・燃料設計方法

金属燃料炉心の設計では、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を 650°C に制限しており、原子炉出入口温度は酸化物炉心に対して 50°C 程度低い設定となる。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、MOX 燃料炉心に対し、中性子スペクトルが硬いこと、Pu 富化度が低いことに起因して同じ出力を得るために中性子束レベルが高くなること、単位体積当たりの重金属密度が大きいことから、同じ燃焼度当たりの高速中性子照射量 ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) 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。以上の特徴を踏まえ、以下に魅力ある金属燃料炉心の設計方法について示す。

### 2.1 金属燃料炉心の設計条件と設計目標

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 ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) が増加する傾向にあり、燃料度 150GWd/t では ODS 鋼の開発目標（設計目標目安）である  $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  を超過することが知られている<sup>(2), (3)</sup>。また、設計目標目安を超えた高速中性子照射量 ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) 条件において構造材の照射変形を考慮しても成立する燃料集集体仕様とした場合には、燃料体積比が十分に確保できず、MOX 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。以上を踏まえ、以下の通りコンパクト型炉心及び高出口温度型炉心概念を構築する。

コンパクト型炉心は、いわゆる従来型炉心であり、MOX 燃料炉心と同様に Pu 富化度 2 領域型仕様を有している。コンパクト型炉心の検討においては MOX 燃料炉心に対する相対的な魅力追求を主眼に置き、MOX 燃料炉心と同様の炉心配置、同等の増殖比を有する金属燃料炉心を構築する。本炉心の検討では、高速中性子照射量の設計目標目安を満足させることよりも炉心部取出平均燃焼度の目標達成を重視することとし、材料の開発や高精度な照射挙動の把握等の開発課題は大きくなるものの、それにより得られる経済性の向上を図ることとする。具体的には、ODS 鋼の開発目標である最大高速中性子照射量  $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) の条件で照射変形上成立する燃料仕様を設定し、炉心材料の照射変形量の合理化、すなわち、照射変形量は高速中性子照射量  $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) 相当以上とはならないことを仮定する。そして、高速中性子照射量の設計目標目安からの超過を許容し、炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を達成し、MOX 燃料炉心に比肩し得る金属燃料炉心を構築する。このような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、MOX 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。

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型炉心を構築する。高出口温度型炉心は、単一 Pu 富化度でかつ内部転換比が 1 近傍となるように Pu 富化度を設定することにより、出力変動を抑制している。また、径方向出力分布平坦化はピン径等の多段階化により重金属密度を調整することにより行う。これらの工夫により、図 2.1-1、2.1-2 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、MOX 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。本炉心の検討では、被覆管最高温度 650°C の条件で MOX 燃料炉心並みの原子炉出入口温度達成に主眼をおき、高速中性子照射量制限を満足する炉心を構築する。

以上の記述に基づいて設定した、コンパクト型及び高出口温度型の 2 つの炉心の基本仕様、設計条件、設計目標を表 2.1-1、2.1-2 に示す。

## 2.2 金属燃料炉心の検討フロー

コンパクト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 2.2-1、2.2-2 に示す。両炉心概念について、表 2.1-1、2.1-2 に示す設計条件と設計目標に従い、炉心構築を行う。

コンパクト型炉心の構築では、まず大型炉心について、2002 年度の仕様<sup>③</sup>を基本にナトリウムボイド反応度の非均質効果の変更 (MOX 燃料炉心の 0.90 から金属燃料炉心の 0.96 へ)<sup>④</sup>、熱効率見直しによる熱出力の変更 (3,900 から 3,750MWt へ)、下部遮へい体構造の見直しを反映させて、ナトリウムボイド反応度の低減を図った高燃焼度化導入期炉心 (増殖比 1.1~1.2) を構築する。構築した炉心について、熱特性解析等の詳細評価と増殖比等に関する柔軟性評価を行う。次に、中型炉心についてだが、熱出力が大型炉心の半分であることから、炉心の構築は燃料仕様を変更せずに、集合体数を約半数とすることにより行う。構築した炉心について、熱特性解析等の詳細評価と増殖比等に関する柔軟性評価を行う。

他方、高出口温度型炉心の構築においては、まず中型炉心について、2002 年度の仕様<sup>③</sup>を基本に、燃料仕様の改良による設計範囲の拡大や開発課題の縮小を図り、ナトリウムボイド反応度の非均質効果の見直しを踏まえた上で、高速中性子照射量制限目安を満足する平衡期炉心 (増殖比 1.04 程度) を構築する。ここで、燃料仕様の改良とは、ピン径の多段階化の代わりにピン径を単一として金属燃料中の Zr 含有率を多段階化する方策であり、炉心内側の冷却材体積比の低減により、ナトリウムボイド反応度を抑制することができる。また、開発課題の縮小とはワイヤスペーサの適用を意味しており、単一ピン径とすることにより適用が容易となる。構築した炉心について、熱特性解析等の詳細評価と増殖比等に関する柔軟性評価を行う。次に、大型炉心の構築では、基本的には中型炉心の仕様を基準とするが、特に、燃料取扱の効率を考慮して、燃料集合体数が 700 体程度以下となるように燃料集合体仕様の見直しについて検討を行うこととする。構築した炉心について、熱特性解析等の詳細評価と増殖比等に関する柔軟性評価を行う。

表 2.1-1 コンパクト型炉心の主要な設計条件

項 目		大型炉	中型炉	
プラント仕様	原子炉電気出力	1,500MWe	750MWe	
	原子炉熱出力	3,750MWt	1,875MWt	
	冷却材出口/入口温度	505 / 350°C	←	
	1次系流量	18,983kg/s	9,491kg/s	
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	U-Pu-Zr三元合金金属燃料	←	
	Zr含有率	10wt%	←	
	炉心型式	均質Pu富化度2領域	←	
	再臨界回避方策	MABLE型燃料集合体 <sup>*1</sup>	←	
	燃料組成	組成	高速炉多重リサイクル組成 <sup>*2</sup>	←
		FP混入率	0.6vol%	←
炉心材料	被覆管	ODS鋼 <sup>*3</sup>	←	
	ラッパ管	PNC-FMS鋼 <sup>*3</sup>	←	
制限条件	安全設計要求	ナトリウムポイド反応度	8\$程度以下	
	燃料健全性	最大線出力	500W/cm程度以下	←
		高速中性子照射量 <sup>*4</sup>	$5 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以下 <sup>*5</sup>	←
		被覆管最高温度 <sup>*6</sup>	650°C以下	←
		CDF(通常運転時)	0.5以下	←
取合条件	炉心燃料スミア密度	75%TD	←	
	遮へい体外接円径	6.6m以下	5.5m以下	
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応配置	←	
	燃料バンドル部圧損	0.2MPa以下	←	
炉心性能目標	増殖比	導入期炉心	1.1~1.2程度	
		平衡期炉心	1.04程度	
	複合システム倍増時間(導入期炉心)	50年程度以下	←	
	取出平均燃焼度	炉心部	150GWd/t程度 <sup>*7</sup>	←
		全炉心 <sup>*8</sup>	60GWd/t程度以上	←
運転サイクル長さ	18ヶ月以上	←		

\*1 5.1(4)(88ページ)参照

\*2 金属燃料FBR多重リサイクル組成 (wt%)

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245  
= 1.1/ 66.0/ 25.2/ 2.4/ 2.4/ 0.4/ 1.6/ 0.5/ 0.4/ 0.1

\*3 炉心材料組成[炉心・燃料設計用] (wt%)

Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/ 11.0/ 0.4/ 0.5/ 0.6/ 2.0

\*4 E>0.1MeV

\*5 高速中性子照射量設計目標目安(高燃焼度化炉心以外に適用)

\*6 内面

\*7 高燃焼度化炉心のみに適用

\*8 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表 2.1-2 高出口温度型炉心の主要な設計条件

項目		大型炉	中型炉	
プラント仕様	原子炉電気出力	1,500MWe	750MWe	
	原子炉熱出力	3,570MWt	1,785MWt	
	冷却材出口/入口温度	550 / 395°C	←	
	1次系流量	18,200kg/s	9,083kg/s	
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	U-Pu-Zr三元合金金属燃料	←	
	Zr含有率	10wt%以上	←	
	炉心型式	均質Zr含有率2領域	←	
	再臨界回避方策	MABLE型燃料集合体 <sup>*1</sup>	←	
	燃料組成	組成	高速炉多重リサイクル組成 <sup>*2</sup>	←
		FP混入率	0.6vol%	←
炉心材料	被覆管	ODS鋼 <sup>*3</sup>	←	
	ラッパ管	PNC-FMS鋼 <sup>*3</sup>	←	
制限条件	安全設計要求	ナトリウムボイド反応度	8\$程度以下	←
		最大線出力	500W/cm程度以下	←
	燃料健全性	高速中性子照射量 <sup>*4</sup>	$5 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以下 <sup>*5</sup>	←
		被覆管最高温度 <sup>*6</sup>	650°C程度以下	←
		CDF(通常運転時)	0.5以下	←
取合条件	炉心燃料スミア密度	75%TD	←	
	遮へい体外接円径	6.6m以下	5.5m以下	
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応配置	←	
	燃料バンドル部圧損	0.2MPa程度以下	←	
炉心性能目標	増殖比	導入期炉心	1.1~1.2程度	←
		平衡期炉心	1.04程度	←
	複合システム倍増時間(導入期炉心)	50年程度以下	←	
	取出平均燃焼度	炉心部	150GWd/t程度 <sup>*7</sup>	←
		全炉心 <sup>*8</sup>	60GWd/t程度以上	←
運転サイクル長さ	18ヶ月以上	←		

\*1 5.1(4)(88ページ)参照

\*2 金属燃料FBR多重リサイクル組成 (wt%)  
 Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245  
 = 1.1/ 66.0/ 25.2/ 2.4/ 2.4/ 0.4/ 1.6/ 0.5/ 0.4/ 0.1

\*3 炉心材料組成[炉心・燃料設計用] (wt%)  
 Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/ 11.0/ 0.4/ 0.5/ 0.6/ 2.0

\*4 E>0.1MeV

\*5 高速中性子照射量設計目標目安(高燃焼度化炉心以外に適用)

\*6 内面

\*7 高燃焼度化炉心のみに適用

\*8 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度



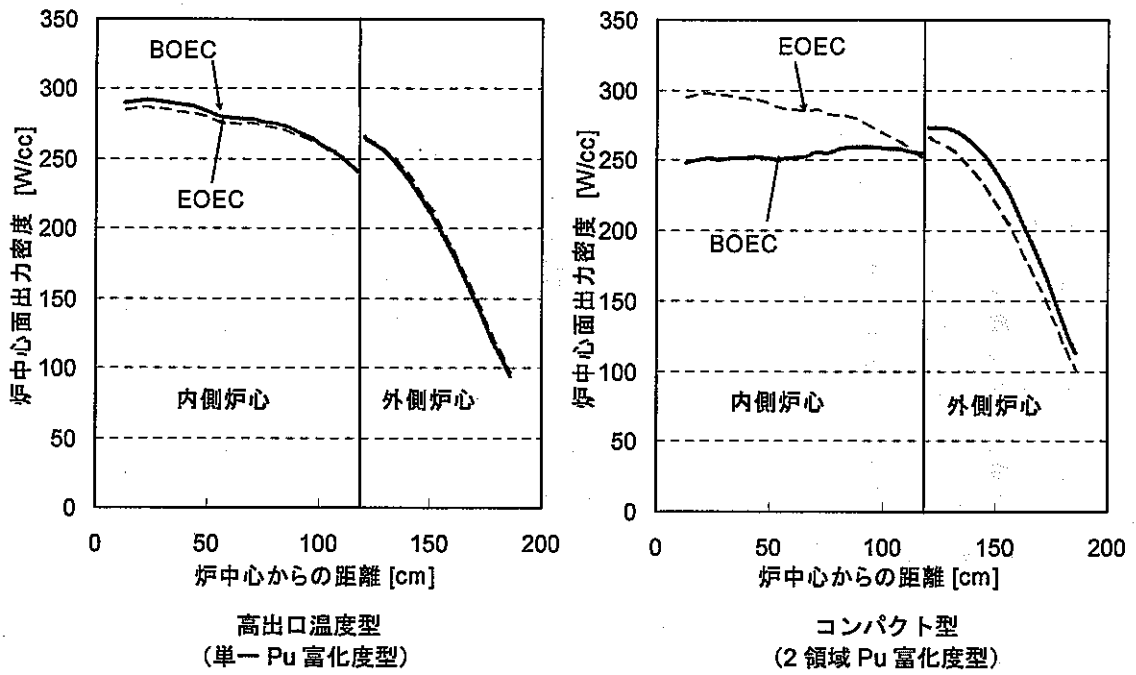


図 2.1-1 燃焼期間中の径方向出力分布変動の比較

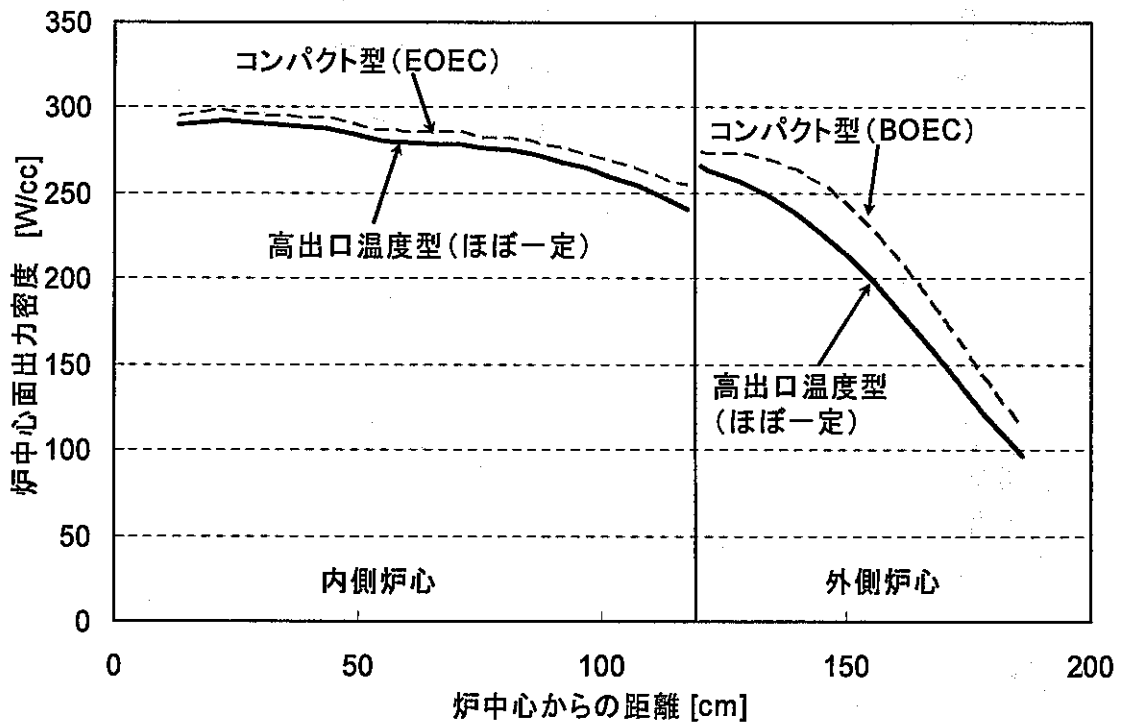


図 2.1-2 燃焼期間中の径方向最大出力分布の比較

(図 2.1-1 中の各炉心の径方向最大出力をプロット)

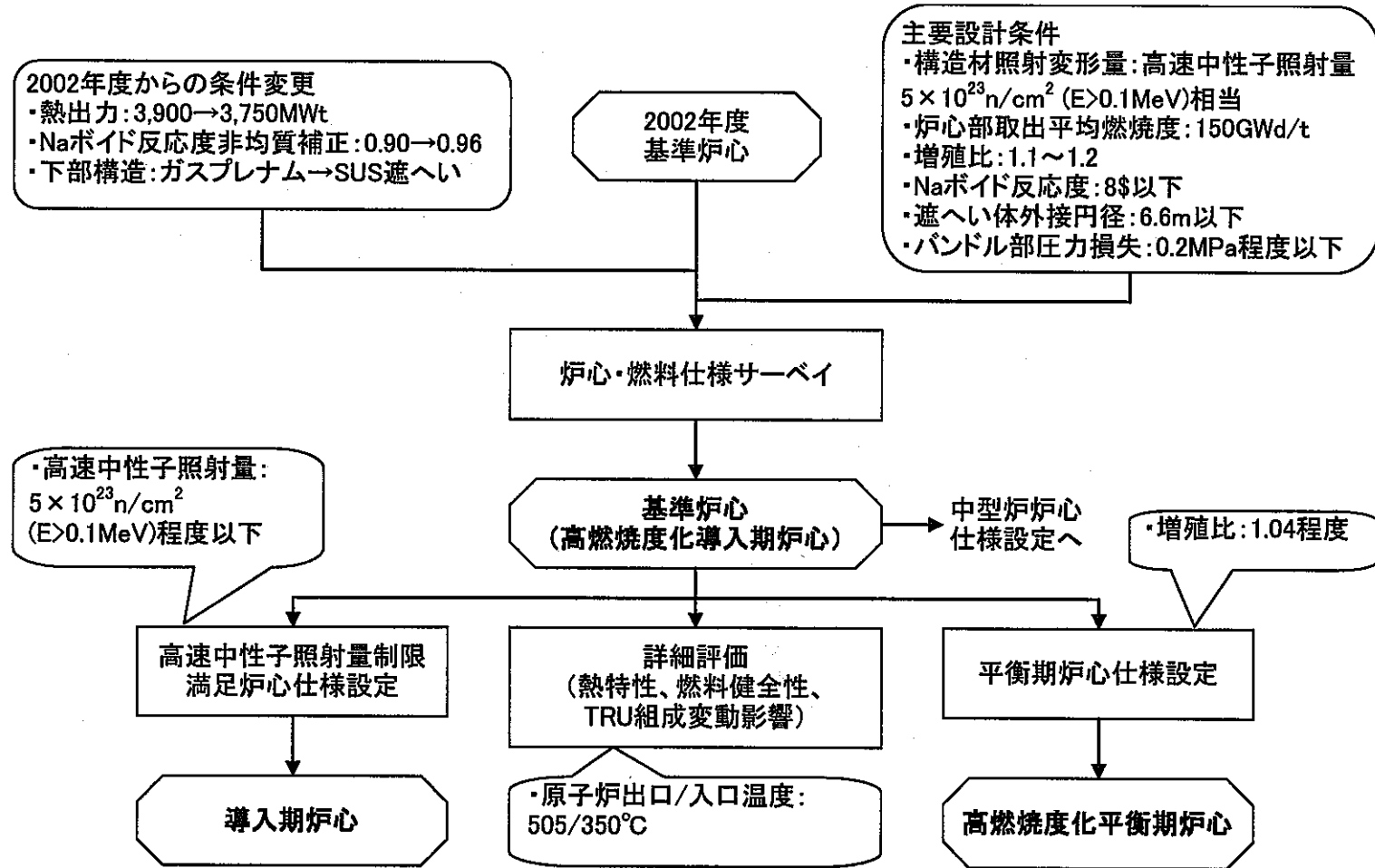


図 2.2-1(1) コンパクト型炉心の検討スキーム -大型炉心-

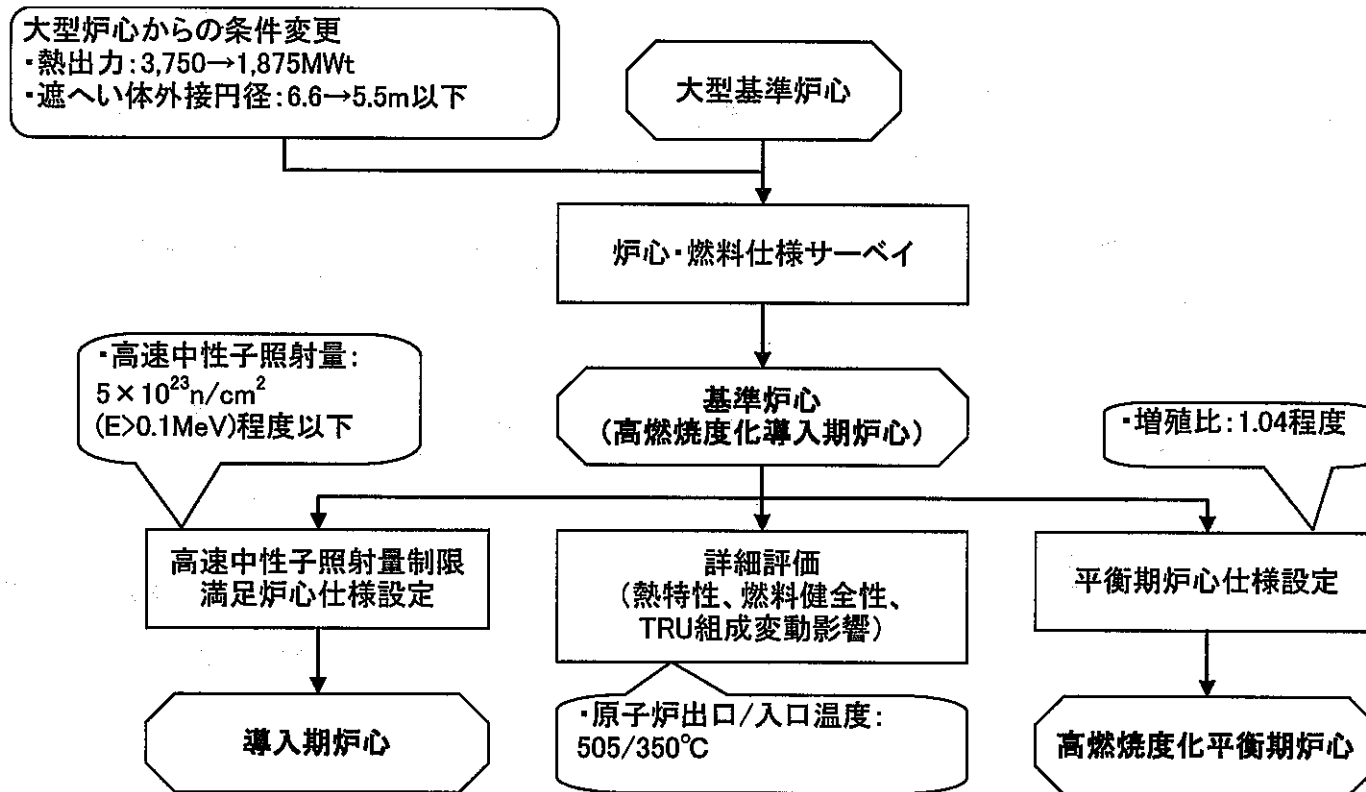


図 2.2-1(2) コンパクト型炉心の検討スキーム —中型炉心—

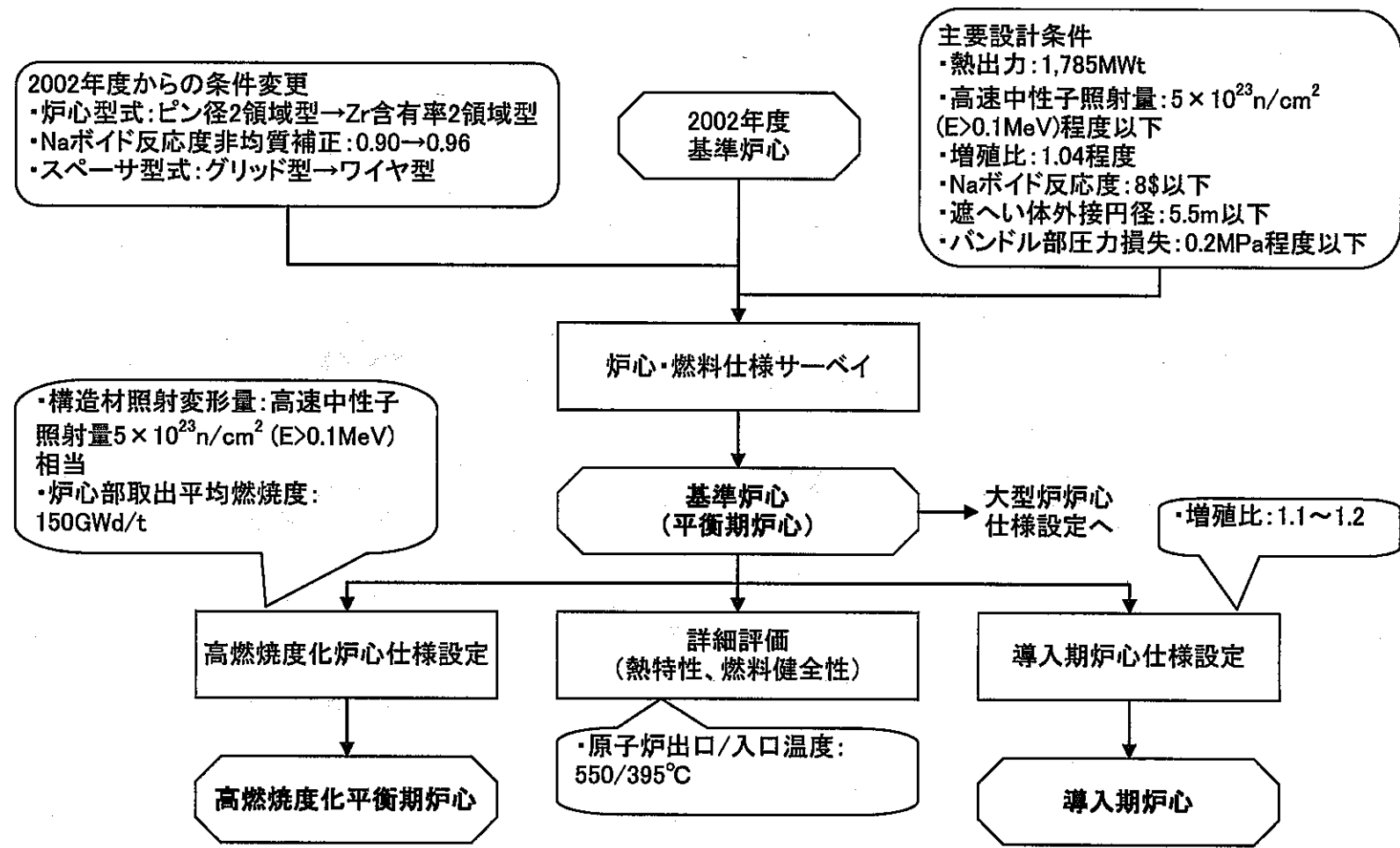


図 2.2-2(1) 高出口温度型炉心の検討スキーム - 中型炉心 -

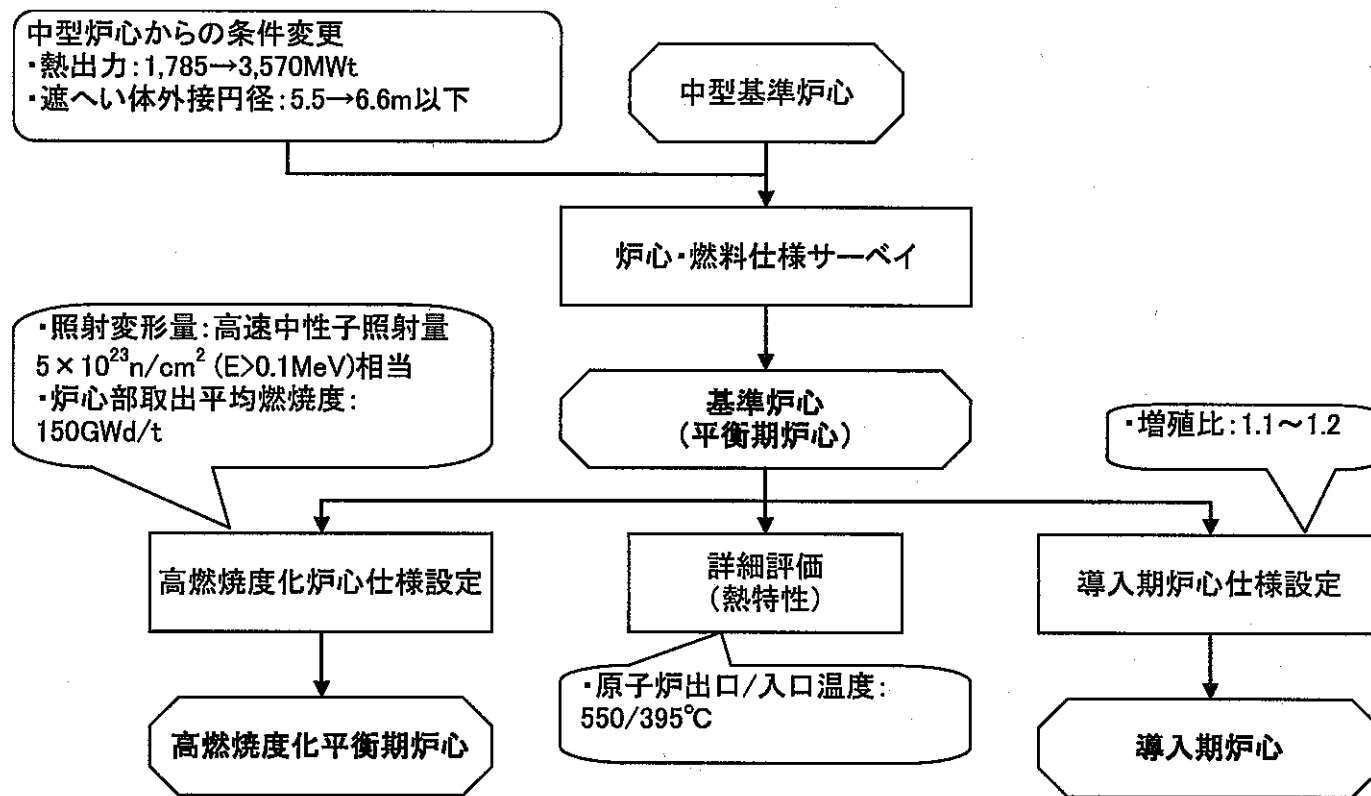


図 2.2-2(2) 高出口温度型炉心の検討スキーム ー大型炉心ー

### 3. コンパクト型炉心の概念検討

コンパクト型金属燃料炉心として、電気出力 1,500MWe、熱出力 3,750MWt を有する大型炉心、及び、電気出力 750MWe、熱出力 1,875MWt を有する中型炉心を対象とし、以下に示すとおり検討を行った。

#### 3.1 検討条件

##### (1) 核特性解析

解析条件は次の通りである。

- ・炉定数：高速炉用統合炉定数 ADJ2000R<sup>(5)</sup> (JFS-3 型式 70 群)
- ・随伴 FP 量：0.6vol% (ANL の金属電解法再処理を想定)
- ・随伴 FP の取扱い：Nd-143 で代表させ、FP 等価係数 1.0 を適用 (ANL の金属電解法再処理を想定)
- ・燃焼特性：2次元 RZ 体系中性子 7 群拡散燃焼計算により算出
- ・ナトリウムボイド反応度：基準状態に対し炉心部のラッパ管内のナトリウムをボイド化し、2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (0.96) を考慮
- ・ドップラー係数：基準状態に対し炉心部の重金属核種のみを昇温させ、2次元 RZ 体系中性子 18 群拡散計算により算出し、非均質補正 (1.05) を考慮
- ・最大線出力、最大高速中性子照射量：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・熱特性解析用出力分布：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・制御棒価値計算：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出し、輸送補正 (0.96)、メッシュ補正 (1.07)、群縮約補正 (0.97)、ランピング効果 (制御棒干渉効果の過度の保守性を排除するためにランピング効果 0.77 となるように B<sub>4</sub>C 原子数密度を希釈)、不確かさ (3σで 9%) を考慮

##### (2) 熱特性解析

核計算で得られた 3次元出力分布を基に熱特性解析を行う。被覆管温度計算においては、単チャンネルモデルを適用した。また、被覆管内面最高温度が出現するのは炉心上端部であると予想されるが、保守的に上部軸ブランケット発熱も考慮し、単チャンネル発熱に基づいた解析とした。解析条件は次の通りである。

- ・1次系流量：18,983kg/s (大型炉心)、9,491kg/s (中型炉心)  
(炉心領域に配分できる流量として1次系流量の90%を想定)
- ・原子炉出口/入口温度：505°C/350°C
- ・被覆管内面最高温度制限：650°C (液相形成防止)
- ・工学的安全係数：表 3.1-1 に示すとおり (実証炉設計研究で使用された係数に対し、各部製造公差とスラグ偏心効果を ANL の製造実績に基づき見直し)
- ・被覆管ホットスポットファクタ：1.244 (被覆管内面)、1.248 (被覆管肉厚中心)  
(前記工学的安全係数より算出)
- ・周辺流れ効果係数：1.09
- ・圧力損失評価式：Cheng-Todreas 式<sup>(6)</sup>
- ・流量領域：最大 8 領域程度 (従来設計研究と同様)
- ・スペーサ形式：ワイヤ型

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。

### (3) 燃料健全性解析

熱特性解析において得られた燃料要素の出力と被覆管肉厚中心温度の履歴に基づき、被覆管の内面及び外面の腐食、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、燃料健全性評価を行う。

- ・材料特性評価式：クリープ強度 ODS 鋼暫定評価式<sup>(7)</sup>
  - 内面腐食 ODS 鋼暫定評価式
  - 外面腐食 ODS 鋼暫定評価式<sup>(7)</sup>

### (4) 柔軟性評価

基準炉心である高燃焼度化導入期炉心を基本とし、①増殖性能への柔軟性評価 (平衡期炉心の構築)、②炉心部取出平均燃焼度への柔軟性 (高速中性子照射量制限目安を満足する炉心の構築)、③FBR 導入期における軽水炉取り出し TRU 組成の受け入れ性に関する評価、すなわち、TRU 組成変動影響評価を行う。具体的には、核特性解析を行うことにより核特性への影響の定量的評価、あるいは、設計対応の可否の評価を行う。

## 3.2 検討結果

### 3.2.1 大型炉心

#### (1) 核特性解析

2002 年度に設定した炉心を基準としたサーベイ結果を表 3.2-1 に示す。2002 年度炉心仕様では、ナトリウムボイド反応度の非均質効果の見直しに伴い、ナトリウムボイド反応度が 8\$ を超過している。Case1 は、熱効率の向上に伴う熱出力の低下を炉心高さの減少 (90 → 85cm) により対応させた炉心であり、ナトリウムボイド反応度は 8\$ を満足しているが、バンドル部圧力損失に余裕が生じることになる。Case2 は炉心高さ減少によるバンドル部圧力損失の余裕を燃料体積比の向上に充てた炉心であり、冷却材体積比の減少により更なるナトリウムボイド反応度の改善が見られている。Case3 は下部遮へい体のステンレス鋼の体積比を約 24% から標準的な値 (約 73%) へ増加させた場合であるが、遮へい体仕様変更に伴うナトリウムボイド反応度の漏洩成分の減少を補うために、炉心高さを 80cm に減少させ、ナトリウムボイド反応度を 8\$ とした炉心である。ナトリウムボイド反応度と下部軸遮へい構造から、Case3 の炉心を基準炉心として選定することとする。主要燃料仕様を表 3.2-2 に、炉心配置を図 3.2-1 にそれぞれ示す。

引き続き、設定した基準炉心について、詳細な核特性解析を行った。基準炉心の主要炉心核特性を表 3.2-3 に、物量収支を表 3.2-4 に、制御反応度収支を表 3.2-5 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 20 ヶ月、増殖比 1.16、ナトリウムボイド反応度 8.0\$、炉心部取出平均燃焼度 153GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 72GWd/t であり設計条件を満足している。最大高速中性子照射量は予測されたとおりに設計目標目安の  $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  を約 50% 超過し、 $7.3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) に達している。装荷時核分裂性 Pu 重量は 4.0t/GWe が得られた。また、複合システム倍増時間は 39 年となった。制御反応度収支については成立が見られるが、MOX 燃料炉心と同等の制御棒割合

としているために約 2%  $\Delta k/kk'$  の停止余裕が見られており、制御棒配置の合理化が可能であることが分かる。

## (2) 熱特性解析

先行設計例を参考にし、内側炉心 4 領域、外側炉心 4 領域の計 8 領域として、出入口温度は 505/350°C の条件で、被覆管内面最高温度制限 650°C を満足するよう流量配分を行った。流量配分結果を表 3.2-6 に、流量領域区分を図 3.2-2 にそれぞれ示す。バンドル部圧力損失は最大で 0.18MPa であり、制限の 0.2MPa 程度以下を満足している。

燃料健全性評価用データとして、流量領域毎の代表燃料要素の出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴をそれぞれ表 3.2-7、表 3.2-8 の通り求めた。

## (3) 燃料健全性解析

得られた出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴を用いて、燃料健全性評価を行った。燃料健全性の評価結果を表 3.2-9 に示す。寿命末期の被覆管周方向応力は最大で 150MPa であり F/S で暫定的に設定した制限目安 175MPa 以下（高燃焼度化炉心）を満足している。寿命末期において、CDF は最大で 0.1 であり制限の 0.5 以下を満足している。以上のように、燃料健全性の成立性が確認できた。

## (4) 柔軟性解析

### ① 増殖性能

導入期炉心に対し、径ブランケット（2 層）の削除により、増殖比 1.04 程度の平衡期炉心を構築した。設定した炉心の配置を図 3.2-3 に、主要炉心特性を表 3.2-10 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 19 ヶ月、増殖比 1.04、ナトリウムボイド反応度 7.9%、炉心部取出平均燃焼度 151GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 95GWd/t であり、設計条件を満足している。最大高速中性子照射量は導入期炉心と同様に  $7.4 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) に達している。ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は、導入期炉心よりも約 20GWd/t 向上しており、燃料サイクルコストの低減に資することができると思われる。

### ② 炉心部取出平均燃焼度

高燃焼度化炉心と同じ炉心仕様で高速中性子照射量制限を満足させた場合、ブランケットを含む取出平均燃焼度は非常に低い値となるため、径ブランケットを 2 層から 1 層としている。主要核特性を表 3.2-11 に、炉心配置を図 3.2-4 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 18 ヶ月、増殖比 1.19、ナトリウムボイド反応度 7.6%、炉心部取出平均燃焼度 105GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 59GWd/t であり、炉心部取出平均燃焼度を除いて設計条件を満足している。また、複合システム倍増時間は 37 年となり、高燃焼度化炉心と同等である。このように、炉心部取出平均燃焼度を除けば、他の設計条件を全て満足する炉心を構築することができた。

### ③ TRU 組成変動

表 3.2-12 に 2 種類の軽水炉取出燃料 TRU 組成を用いた場合の炉心特性への影響評価結果を示す。燃焼反応度については 1%  $\Delta k/kk'$  の悪化が見られる場合があるので、制御反応度



収支の合理化において留意する必要がある。ナトリウムボイド反応度については、最大で 8.6\$ となり、制限の 8\$ を超過しているが、炉心高さ減少等の炉心・燃料仕様の変更により十分対応可能な範囲であると考えられる。増殖性能については、増殖比や複合システム倍増時間に大きな差は見られていない。以上から、TRU 組成変動による影響は制御棒設計や安全特性への影響は比較的大きく、燃料サイクルへの影響は小さいが、いずれも設計対応可能な範囲であることが分かった。

### 3.2.2 中型炉心

#### (1) 核特性解析

大型炉心仕様を基本とし、燃料仕様の大幅な変更なしに、燃料集合体数を約半数とすることにより中型炉心を構築した。大型炉心と同一燃料集合体仕様とした場合には、ナトリウムボイド反応度に余裕が見られたため、中型炉心では炉心高さを 85cm とした（大型炉心の燃料仕様は 85cm 炉心高さにおいてバンドル部圧力損失が適切になるように設定されており、80cm 炉心高さではバンドル部圧力損失に余裕がある。）。主要燃料仕様を表 3.2-13 に、炉心配置を図 3.2-5 にそれぞれ示す。

引き続き、設定した基準炉心について、詳細な核特性解析を行った。基準炉心の主要炉心核特性を表 3.2-14 に、物量収支を表 3.2-15 に、制御反応度収支を表 3.2-16 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 21 ヶ月、増殖比 1.17、ナトリウムボイド反応度 7.6\$、炉心部取出平均燃焼度 154GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 63GWd/t であり、設計条件を満足している。最大高速中性子照射量は大型炉心の構築において見られた場合と同様に設計目標目安の  $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  を超過し、 $7.6 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) に達している。装荷時核分裂性 Pu 重量は 4.4t/GWe が得られた。また、複合システム倍増時間は 38 年となった。制御反応度収支については成立が見られるが、MOX 燃料炉心と同等の制御棒割合としているために約 2%  $\Delta k/k'$  の停止余裕が見られており、制御棒配置の合理化が可能であることが分かる。

#### (2) 熱特性解析

先行設計例を参考にし、内側炉心 4 領域、外側炉心 4 領域の計 8 領域として、出入口温度は 505/350°C の条件で、被覆管内面最高温度制限 650°C を満足するよう流量配分を行った。流量配分結果を表 3.2-17 に、流量領域区分を図 3.2-6 にそれぞれ示す。バンドル部圧力損失は最大で 0.19MPa であり、制限の 0.2MPa 程度以下を満足している。

燃料健全性評価用データとして、流量領域毎の代表燃料要素の出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴をそれぞれ表 3.2-18、表 3.2-19 の通り求めた。ここでは、燃焼期間を通じた流量配分領域毎の燃料要素について、最大出力を示すもの、出力の平均値が最大となるもの、寿命末期に代々出力となるものを代表燃料要素として選択した。

#### (3) 燃料健全性解析

得られた出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴を用いて、燃料健全性評価を行った。燃料健全性の評価結果を表 3.2-20 に示す。寿命末期の被覆管周方向応力は最大で 137MPa であり F/S で暫定的に設定した制限目安 175MPa 以下を満足している。寿命末期において、CDF は最大で 0.06 であり制限の 0.5 以下に対して十分な余裕がある。なお、流量領域毎の燃料要素について、平均出力の最も高いものが、寿命末期被覆管周方向応力及び CDF 共最も高

い値を示していることが分かった。以上のように、燃料健全性の成立性が確認できた。

#### (4) 柔軟性解析

##### ①増殖性能

導入期炉心に対し、径ブランケット1層の削除と上部軸ブランケットを40cmから12cmへ削減することにより、増殖比1.04程度の平衡期炉心を構築した。設定した炉心の配置を図3.2-7に、主要炉心特性を表3.2-21にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ20ヶ月、増殖比1.04、ナトリウムボイド反応度7.4\$, 炉心部取出平均燃焼度149GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度99GWd/tであり、設計条件を満足している。最大高速中性子照射量は $7.3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ )に達している。ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は、導入期炉心よりも約40GWd/t向上しており、燃料サイクルコストの低減に資することができると考えられる。

##### ②炉心部取出平均燃焼度

高燃焼度化炉心と同じ炉心仕様で高速中性子照射量制限を満足させた場合、ブランケットを含む取出平均燃焼度は非常に低い値となるため、径ブランケットを2層から1層とし、更に、上部軸ブランケットを40cmから20cmへ削減している。主要核特性を表3.2-22に、炉心配置を図3.2-8にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ18ヶ月、増殖比1.14、ナトリウムボイド反応度7.2\$, 炉心部取出平均燃焼度102GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度62GWd/tであり、炉心部取出平均燃焼度を除いて設計条件を満足している。また、複合システム倍増時間は53年となった。このように、炉心部取出平均燃焼度を除けば、他の設計条件を全て満足する炉心を構築することができた。

##### ③TRU組成変動

表3.2-23に2種類の軽水炉取出燃料TRU組成を用いた場合の炉心特性への影響評価結果を示す。燃焼反応度については0.5% $\Delta k/k$ の悪化が見られる場合があるので、制御反応度収支の合理化において留意する必要がある。ナトリウムボイド反応度については、最大で8.3\$となり、制限の8\$を超過しているが、炉心高さ減少等の炉心・燃料仕様の変更により十分対応可能な範囲であると考えられる。増殖性能については、増殖比や複合システム倍増時間に大きな差は見られていない。以上から、TRU組成変動による影響は制御棒設計や安全特性への影響は比較的大きく、燃料サイクルへの影響は小さいが、いずれも設計対応可能な範囲であることが分かった。

### 3.3 まとめ

ナトリウムボイド反応度の非均質効果等の改訂を反映させて、2002年度炉心に対して見直しを図った。高速中性子照射量設計目標目安の伸長及び照射変形量の合理化を仮定し、炉心部取出平均燃焼度150GWd/tを達成する大型及び中型高燃焼度化コンパクト型炉心を構築した。構築した炉心は、いずれの設計条件、設計目標も満足している。ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は60~70GWd/tとなった。また、最大高速中性子照射量は $7.3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ )に及んでいる。装荷時核分裂性Pu重量は大型炉心で4.0t/GWe、中型炉心で4.4t/GWeが得られ、早期導入性のポテンシャルを十分に有していることが分かった。

熱特性解析として、原子炉出口／入口温度 505／350℃、被覆管内面最高温度制限 650℃の条件で冷却材流量配分計画を策定し、流量配分の成立を図った。策定した流量配分計画の下、通常運転時の燃料健全性評価を行い、健全性が担保されていることを確認した。

柔軟性評価については、①炉心部取出平均燃焼度、②増殖性能、③TRU 組成変動に関して行った。①炉心部取出平均燃焼度に関しては、高速中性子照射量制限目安を満足する炉心を構築したが、炉心部取平均燃焼度は 100GWd/t 程度に制約されるものの、径ブランケット量の調整により増殖比を同程度とした炉心では、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は 60GWd/t 前後であり、高燃焼度化炉心と同程度であることが分かった。②増殖性能については、径ブランケットを削除することにより平衡期炉心を構築し、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は 100GWd/t 程度まで高められ、経済性向上が期待できることが分かった。③TRU 組成変動については、TRU 組成によってはナトリウムボイド反応度は最大 8.6\$にまで達するが、設計対応により 8\$以下とすることが可能な範囲であると考えられる。

表 3.2-1 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	$\Delta T_{Na}$	$\Delta T_{film}$	$\Delta T_{clad}$
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 (3 $\sigma$ )	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
	スラッグ偏心効果		1.04	1.08

※空欄は 1.00 であることを表す。

表 3.2-1 大型コンパクト型炉心の炉心・燃料仕様サーベイ結果

項目		2002年度基準炉心	2003年度サーベイ		
			Case 1	Case 2*1	Case 3
炉心仕様	原子炉熱出力 (MWth)	3,900	3,750	←	←
	運転サイクル長さ(ヶ月)	21	21	21	20
	炉心高さ (mm)	900	850	←	800
	遮へい体外接円径 (m)	6.38	←	6.34	←
燃料仕様	被覆管外径 (mm)	8.5	←	←	←
	被覆管内径 (mm)	7.5	←	←	←
	被覆管肉厚 (mm)	0.5	←	←	←
	燃料ピン本数	271	←	←	←
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,750	←	1,660	←
	Pu富化度(内側/外側炉心) (wt%)	13.6 / 18.7	14.5 / 19.0	←	14.3 / 18.6
集合体	燃料ピン配列ピッチ (mm)	10.22	←	10.15	←
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.20	←	1.19	←
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	181.2	←	180.0	←
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	171.2	←	170.0	←
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	←	←	←
	ラッパ管間ギャップ (mm)	6.0	←	←	←
	集合体配列ピッチ (mm)	187.2	←	186.0	←
	ワイヤ径 (mm)	1.67	←	1.60	←
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200	←	←	←
	体積比 (%)	燃料	39.4	←	40.0
構造材		23.2	←	23.3	←
冷却材		37.3	←	36.7	←
下部構造	体積比 (%) (構造材/冷却材)	24.2 / 31.7	←	←	72.8 / 27.2
核特性	増殖比	1.165	1.142	1.159	1.164
	炉心部取出平均燃焼度 (GWd/t)	149.7	152.3	150.0	152.5
	Naボイド反応度(平衡末期) (\$) )	8.3	8.0	7.8	8.0

\*1: 2002年度炉心とバンドル部圧力損失が同程度となるように設定した炉心。核特性は推測値。

※径方向炉心配置は変更なし

表 3.2-2 大型コンパクト型炉心の主要燃料仕様

項目		仕様			
		炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr	←	
	被覆管材料	ODS鋼		←	
	被覆管外径 (mm)	8.5		←	
	被覆管内径 (mm)	7.5		←	
	被覆管肉厚 (mm)	0.5		←	
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,660		←	
	ボンド材	ナトリウム		←	
	燃料スミア密度 (%TD)	75	←	85	
	Zr含有率 (wt%)	10	←	←	
	集合体	燃料ピン本数 (本)	271		←
燃料ピン配列ピッチ (mm)		10.15		←	
燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)		1.19		←	
ラッパ管材料		PNC-FMS鋼		←	
ラッパ管外対面間距離 (mm)		180		←	
ラッパ管内対面間距離 (mm)		170		←	
ラッパ管肉厚 (mm)		5		←	
ラッパ管間ギャップ (mm)		6		←	
集合体配列ピッチ (mm)		186		←	
ワイヤ径 (mm)		1.6		←	
ワイヤ巻き付けピッチ (mm)		200		←	
体積比 (%)		燃料 (実効)	40 (30)	←	50 (45)
		構造材	23.3	←	18
	冷却材	36.7	←	32	

表 3.2-3 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の主要炉心核特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	20ヶ月(608日)
燃料交換バッチ数(炉心/径方向ブランケット)	4/4バッチ
炉心高さ	800 mm
軸ブランケット高さ(上/下)	400 mm / 50 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側)	14.3 / 18.5 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	152.5 / 19.0 / 6.8 GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	71.9 GWd/t
燃焼反応度	2.2 % Δk/kk'
増殖比(全体)	1.164
(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.815 / 0.207 / 0.142
最大線出力(内側/外側)	461 / 496 W/cm
炉心平均出力密度	268 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.904 / 0.064 / 0.032
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.5×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	7.3×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ(バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	13.5 / 7.7 / 10.5 t
ブランケット/炉心重金属重量比	約1.3
装荷時核分裂性Pu重量(出力当たり)	4.0 t/GWe
原子炉倍増時間	30年
複合システム倍増時間 <sup>*4</sup>	39年
炉心部ポイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	8.0 \$ <sup>*7</sup>
ドップラー係数[Δk/dT] <sup>*6</sup> (平衡末期)	-3.5×10 <sup>-3</sup>
炉心等価直径	4.87 m
遮へい体外接円径	6.40 m

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E > 0.1 MeV、  
 \*4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、\*5: 非均質補正(0.96)考慮、  
 \*6: 非均質補正(1.05)考慮、\*7: 実効遅発中性子割合0.00356

表 3.2-4(1) 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	21.8	12.2	34.0	23.0	31.6	54.6	88.6
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	7,249.0	4,055.3	11,304.3	7,647.6	10,493.0	18,140.6	29,444.9
U合計	7,270.8	4,067.5	11,338.3	7,670.6	10,524.6	18,195.2	29,533.5
Np-237	5.0	3.8	8.8	0.0	0.0	0.0	8.8
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	5.0	3.8	8.8	0.0	0.0	0.0	8.8
Pu-238	12.5	9.6	22.1	0.0	0.0	0.0	22.1
Pu-239	827.0	630.6	1,457.6	0.0	0.0	0.0	1,457.6
Pu-240	315.8	240.8	556.6	0.0	0.0	0.0	556.6
Pu-241	30.1	22.9	53.0	0.0	0.0	0.0	53.0
Pu-242	30.1	23.0	53.1	0.0	0.0	0.0	53.1
Pu合計	1,215.5	926.9	2,142.4	0.0	0.0	0.0	2,142.4
Am-241	20.0	15.3	35.3	0.0	0.0	0.0	35.3
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	6.3	4.8	11.1	0.0	0.0	0.0	11.1
Am合計	26.3	20.1	46.4	0.0	0.0	0.0	46.4
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	5.0	3.8	8.8	0.0	0.0	0.0	8.8
Cm-245	1.3	1.0	2.3	0.0	0.0	0.0	2.3
Cm合計	6.3	4.8	11.1	0.0	0.0	0.0	11.1
合計	8,523.9	5,023.1	13,547.0	7,670.6	10,524.6	18,195.2	31,742.2
FP <sup>1</sup>	28.6	16.9	45.5	0.0	0.0	0.0	45.5
FP <sup>2</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	28.6	16.9	45.5	0.0	0.0	0.0	45.5

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 3.2-4(2) 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	4.4	4.2	8.6	14.1	24.3	38.4	47.0
U-236	3.0	1.4	4.4	1.9	1.6	3.5	7.9
U-238	5,910.1	3,530.3	9,440.4	7,185.9	10,174.6	17,360.5	26,800.9
U合計	5,917.5	3,535.9	9,453.4	7,201.9	10,200.5	17,402.4	26,855.8
Np-237	4.5	3.2	7.7	0.7	0.5	1.2	8.9
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	4.5	3.2	7.7	0.7	0.5	1.2	8.9
Pu-238	12.0	9.4	21.4	0.2	0.1	0.3	21.7
Pu-239	726.3	478.2	1,204.5	311.0	253.5	564.5	1,769.0
Pu-240	335.1	236.8	571.9	25.0	9.2	34.2	606.1
Pu-241	46.1	29.5	75.6	1.9	0.3	2.2	77.8
Pu-242	30.2	22.2	52.4	0.2	0.0	0.2	52.6
Pu合計	1,149.7	776.1	1,925.8	338.3	263.1	601.4	2,527.2
Am-241	13.4	12.6	26.0	0.1	0.0	0.1	26.1
Am-242m	0.9	0.7	1.6	0.0	0.0	0.0	1.6
Am-243	7.5	5.4	12.9	0.0	0.0	0.0	12.9
Am合計	21.8	18.7	40.5	0.1	0.0	0.1	40.6
Cm-242	0.9	0.6	1.5	0.0	0.0	0.0	1.5
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm-244	6.2	4.0	10.2	0.0	0.0	0.0	10.2
Cm-245	1.2	0.8	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0
Cm合計	8.4	5.5	13.9	0.0	0.0	0.0	13.9
合計	7,101.9	4,339.4	11,441.3	7,541.0	10,464.1	18,005.1	29,446.4
FP <sup>1</sup>	28.6	16.9	45.5	0.0	0.0	0.0	45.5
FP <sup>2</sup>	1,422.0	683.6	2,105.6	129.7	60.4	190.1	2,295.7
FP合計	1,450.6	700.5	2,151.1	129.7	60.4	190.1	2,341.2

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP



表 3.2-4(3) 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	52.5	34.1	86.6	76.7	114.7	191.4	278.0
U-236	6.5	2.8	9.3	3.4	2.6	6.0	15.3
U-238	26,892.9	15,414.5	42,307.4	29,883.5	41,492.4	71,375.9	113,683.3
U合計	26,951.9	15,451.4	42,403.3	29,963.6	41,609.7	71,573.3	113,976.6
Np-237	19.1	14.3	33.4	1.1	0.8	1.9	35.3
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	19.1	14.3	33.4	1.1	0.8	1.9	35.3
Pu-238	49.1	37.7	86.8	0.2	0.1	0.3	87.1
Pu-239	3,177.3	2,261.6	5,438.9	541.7	408.7	950.4	6,389.3
Pu-240	1,305.2	965.4	2,270.6	26.0	8.5	34.5	2,305.1
Pu-241	153.7	105.4	259.1	1.4	0.2	1.6	260.7
Pu-242	119.5	90.3	209.8	0.1	0.0	0.1	209.9
Pu合計	4,804.8	3,460.4	8,265.2	569.4	417.5	986.9	9,252.1
Am-241	66.0	55.8	121.8	0.1	0.0	0.1	121.9
Am-242m	2.3	1.5	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8
Am-243	27.2	20.1	47.3	0.0	0.0	0.0	47.3
Am合計	95.5	77.4	172.9	0.1	0.0	0.1	173.0
Cm-242	3.1	1.8	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9
Cm-243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	21.8	15.5	37.3	0.0	0.0	0.0	37.3
Cm-245	4.8	3.6	8.4	0.0	0.0	0.0	8.4
Cm合計	29.9	21.0	50.9	0.0	0.0	0.0	50.9
合計	31,901.2	19,024.5	50,925.7	30,534.2	42,028.0	72,562.2	123,487.9
FP <sup>1</sup>	114.4	67.4	181.8	0.0	0.0	0.0	181.8
FP <sup>2</sup>	2,193.9	1,067.4	3,261.3	148.3	70.2	218.5	3,479.8
FP合計	2,308.3	1,134.8	3,443.1	148.3	70.2	218.5	3,661.6

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 3.2-4(4) 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	35.2	26.0	61.2	67.8	107.2	175.0	236.2
U-236	9.5	4.2	13.7	5.3	4.2	9.5	23.2
U-238	25,560.6	14,883.8	40,444.4	29,416.5	41,165.8	70,582.3	111,026.7
U合計	25,605.3	14,914.0	40,519.3	29,489.6	41,277.2	70,766.8	111,286.1
Np-237	18.6	13.7	32.3	1.8	1.3	3.1	35.4
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	18.6	13.7	32.3	1.8	1.3	3.1	35.4
Pu-238	48.6	37.5	86.1	0.4	0.1	0.5	86.6
Pu-239	3,076.9	2,107.4	5,184.3	855.5	668.2	1,523.7	6,708.0
Pu-240	1,324.3	961.4	2,285.7	51.1	17.9	69.0	2,354.7
Pu-241	169.6	112.1	281.7	3.3	0.5	3.8	285.5
Pu-242	119.6	89.5	209.1	0.2	0.0	0.2	209.3
Pu合計	4,739.0	3,307.9	8,046.9	910.5	686.7	1,597.2	9,644.1
Am-241	59.4	53.0	112.4	0.2	0.0	0.2	112.6
Am-242m	3.2	2.2	5.4	0.0	0.0	0.0	5.4
Am-243	28.4	20.7	49.1	0.0	0.0	0.0	49.1
Am合計	91.0	75.9	166.9	0.2	0.0	0.2	167.1
Cm-242	4.0	2.3	6.3	0.0	0.0	0.0	6.3
Cm-243	0.4	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
Cm-244	22.9	15.7	38.6	0.0	0.0	0.0	38.6
Cm-245	4.7	3.4	8.1	0.0	0.0	0.0	8.1
Cm合計	32.0	21.6	53.6	0.0	0.0	0.0	53.6
合計	30,485.9	18,333.1	48,819.0	30,402.1	41,965.2	72,367.3	121,186.3
FP <sup>1</sup>	114.4	67.4	181.8	0.0	0.0	0.0	181.8
FP <sup>2</sup>	3,609.4	1,758.5	5,367.9	280.4	132.8	413.2	5,781.1
FP合計	3,723.8	1,825.9	5,549.7	280.4	132.8	413.2	5,962.9

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 3.2-5 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	3.6	0.1	0.2
a)出力補償	0.2	0.1	0.2
b)燃焼補償	2.9		
c)運転余裕	0.2		
d)燃料スエリング補償	0.3		
2.余剰反応度の不確かさ(2 $\sigma$ )	0.5	0.1	0.2
a)臨界性予測誤差	0.0		
b)出力補償予測誤差		0.1	0.2
c)燃料製作公差	0.4		
d)燃料交換余裕	0.2		
3.事故時投入反応度		0.2	0.2
4.最小反応度停止余裕	0.4		
必要制御反応度	4.5	0.4	0.6
補正後制御棒価値	6.0	2.1	2.5
反応度停止余裕	1.5	1.7	1.9

単位:% $\Delta k/kk'$

表 3.2-6 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の流量配分結果

炉心領域	領域番号	集合体数	燃料要素 最大出力	集合体流量	必要 領域流量	被覆管内面 最高温度	バンドル部 圧力損失
			[kW]	[kg/s]	[kg/s]	[°C]	[MPa]
内側炉心	1	60	34.2	36.90	2214.0	648	0.18
	2	162	31.9	34.10	5524.2	648	-
	3	82	28.6	30.25	2480.5	648	-
	4	32	25.5	26.75	856.0	648	-
外側炉心	5	44	34.0	36.55	1608.2	648	-
	6	38	30.1	31.90	1212.2	649	-
	7	76	27.7	29.15	2215.4	649	-
	8	40	23.1	24.00	960.0	649	-
合計(最大値)	—	534	(34.2)	—	17070.5	(649)	(0.18)
					炉心流量 <sup>*1</sup> [kg/s]	17084.7	
					余剰流量 [kg/s]	+14.2 (+0.1%)	

\*1: 1次系流量の内、90%を燃料集合体冷却用に配分

表 3.2-7 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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		第4サイクル	
		BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
内側炉心	1	29.8	34.2	30.2	34.1	30.0	33.6	29.6	32.9
	2	29.8	31.7	30.1	31.5	30.0	31.1	29.5	30.4
	3	28.0	28.5	28.4	28.4	28.2	28.0	27.8	27.4
	4	25.3	25.3	25.4	25.2	25.3	24.8	24.9	24.3
外側炉心	5	34.0	26.9	32.2	25.7	30.7	24.6	29.3	23.6
	6	29.9	30.1	28.3	28.7	27.0	27.5	25.8	26.4
	7	26.8	27.4	25.4	26.1	24.2	25.0	23.1	24.0
	8	23.0	21.7	22.2	21.1	21.5	20.5	20.9	20.0

※単位: kW

表 3.2-8 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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		第4サイクル	
		BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
内側炉心	1	600.6	637.7	603.8	636.9	602.5	632.8	598.5	626.9
	2	619.5	636.6	622.8	635.6	621.3	631.4	617.1	625.5
	3	634.1	638.6	637.6	637.7	636.4	633.8	632.3	628.2
	4	637.9	638.6	639.9	636.8	638.2	632.6	634.0	626.8
外側炉心	5	637.9	578.2	622.8	567.7	610.1	558.6	598.6	550.3
	6	638.2	639.8	623.1	626.5	610.3	615.1	598.8	604.6
	7	631.1	637.9	616.2	624.3	603.7	612.6	592.4	601.9
	8	640.4	624.9	630.8	616.7	622.4	609.5	614.6	602.7

※単位:°C

表 3.2-9 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力

炉心	流量領域	最高被覆管温度 *1[°C]	平均被覆管温度 *1[°C]	寿命末期被覆管 温度*1[°C]	被覆管周方向応 力*2 [MPa]	CDF*2 [-]
内側炉心	1	638	617	627	150	0.08
	2	637	626	626	150	0.10
	3	639	635	628	140	0.10
	4	640	636	627	121	0.02
外側炉心	5	638	591	550	106	1.8E-05
	6	640	620	605	125	2.1E-03
	7	638	615	602	108	3.0E-04
	8	640	620	603	89	9.3E-05

\*1: 肉厚中心

\*2: 寿命末期

表 3.2-10 大型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性

項目	高燃焼度化平衡期炉心	高燃焼度化導入期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	19ヶ月 (578日)	20ヶ月 (608日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	4/- バッチ	4/4 バッチ
炉心高さ	800 mm	←
軸ブランケット高さ (上/下)	500 mm / 50 mm	400 mm / 50 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側)	14.6 / 18.3 wt%	14.3 / 18.5 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	150.6 / 13.4 / - GWd/t	152.5 / 19.0 / 6.8 GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	94.5 GWd/t	71.9 GWd/t
燃焼反応度	2.7 % Δk/kk'	2.2 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.043	1.164
(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.830 / 0.212 / -	0.815 / 0.207 / 0.142
最大線出力 (内側/外側)	482 / 488 W/cm	461 / 496 W/cm
炉心平均出力密度	268 W/cm <sup>3</sup>	←
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.942 / 0.058 / -	0.904 / 0.064 / 0.032
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$3.7 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$7.4 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$7.3 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	13.5 / 9.4 / - t	13.5 / 7.7 / 10.5 t
ブランケット/炉心重金属重量比	約0.7	約1.3
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.1 t/GWe	4.0 t/GWe
炉心部ポイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期)	7.9 \$ <sup>*5</sup>	8.0 \$ <sup>*5</sup>
ドップラー係数 [Tdk/dT] <sup>*5</sup> (平衡末期)	$-3.5 \times 10^{-3}$	$-3.5 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	4.87 m	←
遮へい体外接円径	6.40 m	←

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E > 0.1 MeV、\*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、\*6: 実効遅発中性子割合 0.00356

表 3.2-11 大型コンパクト型導入期炉心の主要核特性

項目	導入期炉心	高燃焼度化導入期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	18ヶ月 (548日)	20ヶ月 (608日)
燃料交換パッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	3/3 パッチ	4/4 パッチ
炉心高さ	800 mm	←
軸ブランケット高さ (上/下)	400 mm / 50 mm	←
Pu富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側)	13.3 / 18.1 wt%	14.3 / 18.5 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	104.8 / 10.6 / 8.0 GWd/t	152.5 / 19.0 / 6.8 GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	58.6 GWd/t	71.9 GWd/t
燃焼反応度	1.24 % Δk/kk'	2.2 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.187	1.164
(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.864 / 0.211 / 0.112	0.815 / 0.207 / 0.142
最大線出力 (内側/外側)	462 / 498 W/cm	461 / 496 W/cm
炉心平均出力密度	268 W/cm <sup>3</sup>	←
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.922 / 0.053 / 0.025	0.904 / 0.064 / 0.032
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.5×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s	3.5×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	4.9×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>	7.3×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (パッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	18.1 / 10.2 / 6.8 t	13.5 / 7.7 / 10.5 t
ブランケット/炉心重金属重量比	約0.9	約1.3
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	3.8 t/GWe	4.0 t/GWe
原子炉倍增時間	24年	30年
複合システム倍增時間 <sup>*4</sup>	37年	39年
炉心部ボイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.6 \$ <sup>7</sup>	8.0 \$ <sup>8</sup>
ドブラー係数 [Ddk/dT] <sup>*6</sup> (平衡末期)	-3.8×10 <sup>-3</sup>	-3.5×10 <sup>-3</sup>
炉心等価直径	4.87 m	←
遮へい体外接円径	6.40 m	←

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

\*4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、\*5: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*6: 非均質補正 (1.05) 考慮、

\*7: 実効遅発中性子割合0.00361、\*8: 実効遅発中性子割合0.00356

表 3.2-12 大型コンパクト型炉心の TRU 組成変動による炉心特性の比較 (高燃焼度化導入期炉心)

項目	金属燃料高速炉多重リサイクル組成ケース	LWRからの回収TRU組成ケース	
		基準ケース	代表ケース
		LWR(45~49GWd/t)から4年冷却後に回収したTRU組成	A-LWR(60GWd/t)から4年冷却後に回収したTRU組成と40年間中間貯蔵したLWR(45~49GWd/t)から回収したTRU組成を5:5の割合で混合
燃料組成			
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{242\text{m}}\text{Am}/^{242}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{242}\text{Cm}/^{243}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$	1.1 / 66.0 / 25.2 / 2.4 / 2.4 / 0.4 / 1.6 / 0.0 / 0.0 / 0.5 / 0.0 / 0.0 / 0.4 / 0.1	2.2 / 47.0 / 23.2 / 10.7 / 6.5 / 5.6 / 3.1 / 0.0 / 0.0 / 1.3 / 0.0 / 0.0 / 0.4 / 0.0	2.1 / 46.8 / 23.3 / 6.1 / 6.7 / 6.4 / 6.8 / 0.0 / 0.0 / 1.4 / 0.0 / 0.0 / 0.3 / 0.0
炉心部取出平均燃焼度	153 GWd/t	156 GWd/t	156 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>*1</sup>	72 GWd/t	72 GWd/t	72 GWd/t
Pu富化度 <sup>*2</sup> (内側炉心 / 外側炉心)	14.3 / 18.5 wt%	15.7 / 19.8 wt%	15.4 / 20.0 wt%
MA混入率 <sup>*2</sup> (平均)	0.5 wt%	2.0 wt%	3.0 wt%
Fertile含有率 <sup>*2</sup> (平均)	88.6 wt%	88.7 wt%	89.1 wt%
燃焼反応度	2.2 % $\Delta k/kk'$	3.1 % $\Delta k/kk'$	2.0 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体)	1.164	1.144	1.179
(炉心/軸ブランケット / 径ブランケット)	0.815 / 0.207 / 0.142	0.794 / 0.200 / 0.150	0.815 / 0.205 / 0.158
最大線出力 (内側炉心 / 外側炉心)	461 / 496 W/cm	460 / 499 W/cm	450 / 500 W/cm
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$7.3 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$7.3 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$7.3 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
初装荷Pu-fインベントリ	4.0 t/GWe	4.0 t/GWe	3.8 t/GWe
炉心部ボイド反応度 <sup>*4</sup>	8.0 \$ <sup>*5</sup>	8.2 \$ <sup>*5</sup>	8.6 \$ <sup>*5</sup>
ドップラ係数 $[\text{d}k/\text{d}T]$ <sup>*4</sup>	$-3.5 \times 10^{-3}$	$-3.0 \times 10^{-3}$	$-2.8 \times 10^{-3}$
複合システム倍增時間 <sup>*6</sup>	39年	43年	34年

\*1:ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*2:Pu/HM, MA/HM, Fertile/HM、\*3: E &gt; 0.1 MeV、\*4:集合体内非均質効果考慮

\*5:実効遅発中性子割合 0.00356、\*6:燃料炉外滞在期間5年、燃文・定検期間45日

表 3.2-13 中型コンパクト型炉心の主要燃料仕様

項目	仕様			
	炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr	←
	被覆管材料	ODS鋼		←
	被覆管外径 (mm)	8.5		←
	被覆管内径 (mm)	7.5		←
	被覆管肉厚 (mm)	0.5		←
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,660		←
	ボンド材	ナトリウム		←
	燃料スミア密度 (%TD)	75	←	85
Zr含有率 (wt%)	10	←	←	
集合体	燃料ピン本数 (本)	271		←
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	10.15		←
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.19		←
	ラッパ管材料	PNC-FMS鋼		←
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	180		←
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	170		←
	ラッパ管肉厚 (mm)	5		←
	ラッパ管間ギャップ (mm)	6		←
	集合体配列ピッチ (mm)	186		←
	ワイヤ径 (mm)	1.6		←
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200		←
	体積比 (%)	燃料 (実効)	40 (30)	←
構造材		23.3	←	18
冷却材		36.7	←	32



表 3.2-14 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の主要炉心核特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	21ヶ月(639日)
燃料交換バッチ数(炉心/径方向ブランケット)	4/4バッチ
炉心高さ	850 mm
軸ブランケット高さ(上/下)	400 mm / 50 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側)	14.4 / 20.1 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	154.1 / 15.2 / 6.4 GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	63.2 GWd/t
燃焼反応度	2.77 % Δk/k <sup>*</sup>
増殖比(全体)	1.171
(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.790 / 0.170 / 0.212
最大線出力(内側/外側)	427 / 462 W/cm
炉心平均出力密度	255 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.909 / 0.048 / 0.043
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.5×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	7.6×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ(バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	7.1 / 3.8 / 8.1 t
ブランケット/炉心重金属重量比	約1.7
装荷時核分裂性Pu重量(出力当たり)	4.4 t/GWe
原子炉倍増時間	31年
複合システム倍増時間 <sup>*4</sup>	38年
ポイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.6 \$ <sup>*7</sup>
ドップラー係数[Tdk/dT] <sup>*6</sup> (平衡末期)	-3.3×10 <sup>-3</sup>
炉心等価直径	3.32 m
遮へい体外接円径	5.40 m

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E > 0.1 MeV、  
 \*4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、\*5: 非均質補正(0.96)考慮、  
 \*6: 非均質補正(1.05)考慮、\*7: 実効遅発中性子割合0.00356

表 3.2-15(1) 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	10.7	6.8	17.5	11.3	24.4	35.7	53.2
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	3,570.3	2,260.8	5,831.1	3,751.8	8,101.9	11,853.7	17,684.9
U合計	3,581.1	2,267.6	5,848.7	3,763.1	8,126.3	11,889.4	17,738.1
Np-237	2.5	2.4	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	2.5	2.4	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9
Pu-238	6.9	6.5	13.4	0.0	0.0	0.0	13.4
Pu-239	412.6	389.6	802.2	0.0	0.0	0.0	802.2
Pu-240	157.6	148.8	306.3	0.0	0.0	0.0	306.3
Pu-241	15.0	14.2	29.2	0.0	0.0	0.0	29.2
Pu-242	15.0	14.2	29.2	0.0	0.0	0.0	29.2
Pu合計	607.1	573.2	1,180.3	0.0	0.0	0.0	1,180.3
Am-241	10.0	9.5	19.5	0.0	0.0	0.0	19.5
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	3.1	3.0	6.1	0.0	0.0	0.0	6.1
Am合計	13.1	12.4	25.5	0.0	0.0	0.0	25.5
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	2.5	2.4	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9
Cm-245	0.6	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	1.2
Cm合計	3.1	3.0	6.1	0.0	0.0	0.0	6.1
合計	4,206.9	2,858.5	7,065.4	3,763.1	8,126.3	11,889.4	18,954.8
FP <sup>1</sup>	12.5	8.5	21.0	0.0	0.0	0.0	21.0
FP <sup>2</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	12.5	8.5	21.0	0.0	0.0	0.0	21.0

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 3.2-15(2) 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	2.0	2.4	4.4	7.2	18.6	25.8	30.2
U-236	1.5	0.8	2.3	0.9	1.3	2.1	4.4
U-238	2,890.8	1,973.2	4,864.0	3,542.8	7,844.5	11,387.3	16,251.3
U合計	2,894.3	1,976.4	4,870.7	3,550.9	7,864.4	11,415.2	16,285.9
Np-237	2.8	2.2	5.0	0.5	0.6	1.1	6.1
Np-239	0.7	0.3	1.0	0.3	0.3	0.6	1.6
Np合計	3.5	2.5	6.0	0.7	0.9	1.7	7.7
Pu-238	6.7	6.5	13.2	0.1	0.1	0.2	13.4
Pu-239	353.2	280.7	633.9	143.1	202.8	346.0	979.9
Pu-240	164.4	144.9	309.3	10.1	7.6	17.8	327.1
Pu-241	22.5	18.0	40.5	0.7	0.2	0.9	41.5
Pu-242	14.0	12.9	26.9	0.1	0.0	0.1	27.0
Pu合計	560.8	463.1	1,023.9	154.1	210.8	364.9	1,388.8
Am-241	6.6	8.0	14.6	0.1	0.0	0.1	14.7
Am-242m	0.6	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1
Am-243	3.6	3.3	6.9	0.0	0.0	0.0	6.9
Am合計	10.8	11.8	22.6	0.1	0.0	0.1	22.7
Cm-242	0.5	0.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9
Cm-243	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Cm-244	3.6	3.0	6.5	0.0	0.0	0.0	6.5
Cm-245	0.7	0.6	1.2	0.0	0.0	0.0	1.2
Cm合計	4.8	3.9	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7
合計	3,474.2	2,457.7	5,931.9	3,705.8	8,076.1	11,781.9	17,713.7
FP <sup>1</sup>	12.5	8.5	21.0	0.0	0.0	0.0	21.0
FP <sup>2</sup>	736.1	406.3	1,142.4	53.9	47.9	101.8	1,244.2
FP合計	748.6	414.8	1,163.4	53.9	47.9	101.8	1,265.2

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 3.2-15(3) 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	25.6	19.1	44.8	38.4	88.6	126.9	171.7
U-236	3.2	1.5	4.8	1.5	2.0	3.5	8.3
U-238	13,224.7	8,601.7	21,826.4	14,698.1	32,035.1	46,733.2	68,559.6
U合計	13,253.6	8,622.4	21,876.0	14,737.9	32,125.7	46,863.6	68,739.6
Np-237	10.7	9.3	20.0	0.7	0.8	1.5	21.5
Np-239	2.3	0.9	3.3	0.8	1.0	1.7	5.0
Np合計	13.0	10.2	23.3	1.5	1.7	3.2	26.5
Pu-238	27.1	25.8	52.9	0.1	0.1	0.2	53.0
Pu-239	1,568.2	1,368.7	2,936.9	239.6	316.4	556.0	3,493.0
Pu-240	647.7	594.6	1,242.3	10.2	6.9	17.1	1,259.4
Pu-241	76.0	64.5	140.6	0.5	0.1	0.7	141.2
Pu-242	57.6	54.5	112.1	0.0	0.0	0.0	112.1
Pu合計	2,376.7	2,108.0	4,484.7	250.4	323.5	574.0	5,058.6
Am-241	32.9	34.9	67.8	0.0	0.0	0.0	67.8
Am-242m	1.4	1.1	2.6	0.0	0.0	0.0	2.6
Am-243	13.5	12.4	25.9	0.0	0.0	0.0	25.9
Am合計	47.9	48.4	96.3	0.0	0.0	0.0	96.3
Cm-242	1.8	1.2	2.9	0.0	0.0	0.0	2.9
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm-244	11.7	10.4	22.0	0.0	0.0	0.0	22.0
Cm-245	2.4	2.3	4.7	0.0	0.0	0.0	4.7
Cm合計	16.0	13.9	29.9	0.0	0.0	0.0	29.9
合計	15,707.1	10,802.9	26,510.0	14,989.8	32,451.0	47,440.8	73,950.8
FP <sup>1</sup>	50.1	34.0	84.1	0.0	0.0	0.0	84.1
FP <sup>2</sup>	1,126.0	641.1	1,767.1	56.6	50.7	107.3	1,874.3
FP合計	1,176.0	675.1	1,851.1	56.6	50.7	107.3	1,958.4

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 3.2-15(4) 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	16.9	14.7	31.6	34.3	82.8	117.1	148.7
U-236	4.7	2.3	7.0	2.3	3.3	5.6	12.7
U-238	12,545.2	8,314.1	20,859.3	14,489.1	31,777.7	46,266.8	67,126.1
U合計	12,566.8	8,331.1	20,898.0	14,525.7	31,863.8	46,389.5	67,287.5
Np-237	11.0	9.2	20.2	1.2	1.4	2.6	22.7
Np-239	3.0	1.3	4.3	1.0	1.3	2.3	6.6
Np合計	14.0	10.4	24.4	2.2	2.6	4.9	29.3
Pu-238	26.9	25.8	52.7	0.2	0.1	0.3	53.0
Pu-239	1,508.8	1,259.8	2,768.6	382.7	519.3	902.0	3,670.6
Pu-240	654.5	590.7	1,245.3	20.3	14.6	34.9	1,280.1
Pu-241	83.6	68.4	151.9	1.2	0.4	1.6	153.5
Pu-242	56.6	53.2	109.8	0.1	0.0	0.1	109.9
Pu合計	2,330.4	1,997.9	4,328.3	404.5	534.3	938.8	5,267.1
Am-241	29.6	33.4	63.0	0.1	0.0	0.1	63.1
Am-242m	2.0	1.7	3.7	0.0	0.0	0.0	3.7
Am-243	14.0	12.7	26.7	0.0	0.0	0.0	26.7
Am合計	45.5	47.8	93.3	0.1	0.0	0.1	93.5
Cm-242	2.2	1.6	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8
Cm-243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	12.7	10.9	23.7	0.0	0.0	0.0	23.7
Cm-245	2.5	2.2	4.7	0.0	0.0	0.0	4.7
Cm合計	17.6	14.9	32.5	0.0	0.0	0.0	32.5
合計	14,974.4	10,402.1	25,376.5	14,932.6	32,400.8	47,333.3	72,709.8
FP <sup>1</sup>	50.1	34.0	84.1	0.0	0.0	0.0	84.1
FP <sup>2</sup>	1,862.1	1,047.4	2,909.4	110.5	98.6	209.1	3,118.5
FP合計	1,912.1	1,081.4	2,993.5	110.5	98.6	209.1	3,202.5

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 3.2-16 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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	3.8	0.1	0.2
a)出力補償	0.2	0.1	0.2
b)燃焼補償	3.1		
c)運転余裕	0.2		
d)燃料スエリング補償	0.3		
2.余剰反応度の不確かさ(2 $\sigma$ )	0.5	0.1	0.2
a)臨界性予測誤差	0.0		
b)出力補償予測誤差		0.1	0.2
c)燃料製作公差	0.4		
d)燃料交換余裕	0.2		
3.事故時投入反応度		0.5	0.5
4.最小反応度停止余裕	0.4		
必要制御反応度	4.7	0.7	0.9
補正後制御棒価値	6.7	2.5	3.1
反応度停止余裕	2.0	1.8	2.2

単位:% $\Delta k/kk'$

表 3.2-17 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の流量配分結果

炉心領域	流量領域	集合体数	燃料要素 最大出力	集合体 最大出力	集合体流量	必要 領域流量	被覆管内面 最高温度	バンドル部 圧力損失
			[kW]	[MW]	[kg/s]	[kg/s]	[°C]	[MPa]
内側炉心	1	34	35.2	9.53	37.6	1279.0	648	0.18
	2	44	33.0	8.73	35.0	1540.3	648	0.16
	3	48	30.3	8.01	32.0	1537.3	648	0.14
	4	30	27.6	7.04	29.0	869.6	648	0.11
外側炉心	5	24	35.8	9.03	38.2	917.2	648	0.19
	6	30	31.4	7.91	33.3	998.3	648	0.15
	7	26	27.3	6.46	28.7	745.6	648	0.11
	8	26	23.8	5.32	24.8	645.2	648	0.09
合計(最大値)	—	262	(35.8)	2064.5	—	8532.4	(648)	(0.19)
						炉心流量 <sup>*1</sup> [kg/s]	8541.9	
						余剰流量 [kg/s]	+9.5 (+0.1%)	

\*1: 1次系流量の内、90%を燃料集合体冷却用に配分

表 3.2-18 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）における領域内最大出力燃料要素の出力履歴

炉心 領域	流量 領域	燃料 要素*	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		領域代表燃料要素選定理由			
			BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	最大値	平均値	寿命末期	
内側 炉心	1	(1)	35.2	33.6	33.9	32.1	32.4	30.5	30.9	29.0	○			
		(2)	35.0	33.6	33.9	32.3	32.5	30.8	31.1	29.3		○	○	
	2	(1)	33.0	31.4	31.9	30.2	30.6	28.8	29.3	27.5	○			
		(2)	32.8	32.6	31.8	31.3	30.5	29.9	29.2	28.5		○	○	
	3	(1)	30.2	30.3	29.3	29.2	28.2	28.0	27.1	26.8	○	○	○	
	4	(1)	27.0	27.6	26.2	26.6	25.3	25.6	24.3	24.5	○	○	○	
	外側 炉心	5	(1)	35.8	32.1	32.4	29.5	29.7	27.3	27.4	25.4	○	○	
			(2)	33.5	32.7	30.4	30.0	27.9	27.8	25.7	25.9			○
6		(1)	31.4	29.9	28.5	27.4	26.1	25.4	24.1	23.6	○			
		(2)	30.9	29.9	28.5	27.8	26.6	26.0	24.8	24.5		○		
		(3)	29.8	30.1	27.5	28.1	25.6	26.3	23.9	24.7			○	
7		(1)	27.3	26.7	25.2	24.8	23.5	23.3	21.9	21.9	○	○	○	
8		(1)	23.8	21.8	22.4	20.6	21.2	19.6	20.2	18.7	○	○		
		(2)	23.7	22.9	21.9	21.3	20.4	19.9	19.0	18.7			○	

※単位:kW

\*: 流量領域毎代表燃料要素識別番号であり、表3.2-19、20と対応

表 3.2-19 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）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

炉心領域	流量領域	燃料要素*	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		領域代表燃料要素選定理由			
			BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	最大値	平均値	寿命末期	
内側炉心	1	(1)	638.8	626.1	628.4	614.1	616.4	601.3	604.3	589.2	○			
		(2)	636.8	626.1	627.9	615.2	617.0	603.3	605.6	591.6		○	○	
	2	(1)	639.4	626.3	630.5	615.6	619.7	604.1	608.6	592.7	○			
		(2)	638.2	636.1	629.4	625.1	618.7	613.1	607.5	601.3		○	○	
	3	(1)	638.9	640.2	630.3	629.8	620.4	618.7	609.8	607.3	○	○	○	
	4	(1)	634.7	641.0	626.3	631.1	616.9	620.5	606.7	609.6	○	○	○	
	外側炉心	5	(1)	638.6	610.3	612.2	589.6	591.1	572.5	573.3	557.7	○	○	
			(2)	621.3	615.0	596.5	593.8	576.7	576.4	560.0	561.4			○
6		(1)	639.9	626.1	613.3	604.1	592.2	585.9	574.3	570.2	○			
		(2)	635.4	625.9	613.9	607.3	596.2	591.6	580.6	577.6		○		
		(3)	625.0	628.4	604.3	609.6	587.3	593.8	572.2	579.6			○	
7		(1)	641.0	634.2	619.1	615.1	601.0	598.9	585.1	584.4	○	○	○	
8		(1)	642.1	617.7	625.4	603.7	611.1	591.6	598.2	580.6	○	○		
		(2)	640.8	630.5	618.9	611.7	600.8	595.7	584.9	581.4			○	

※単位:℃

\*: 流量領域毎代表燃料要素識別番号であり、表3.2-18、20と対応

表 3.2-20 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力

炉心領域	流量領域	燃料要素*	最高被覆管温度 *1[°C]	平均被覆管温度 *1[°C]	寿命末期被覆管温度 *1[°C]	被覆管周方向応力 *2 [MPa]	CDF*2 [-]
内側炉心	1	(1)	639	615	589	136	2.7E-03
		(2)	637	615	592	137	3.6E-03
	2	(1)	639	617	593	128	2.1E-03
		(2)	638	621	601	135	6.1E-03
	3	(1)	640	624	607	125	4.9E-03
4	(1)	641	623	610	110	1.4E-03	
外側炉心	5	(1)	639	593	558	119	2.2E-05
		(2)	621	588	561	114	9.7E-06
	6	(1)	640	601	570	110	2.4E-05
		(2)	635	604	578	113	7.0E-05
		(3)	628	600	580	110	4.7E-05
	7	(1)	641	610	584	101	4.5E-05
	8	(1)	642	609	581	84	7.9E-06
(2)		641	608	581	84	4.9E-06	

\*1: 肉厚中心 \*2: 寿命末期

\*: 流量領域毎代表燃料要素識別番号であり、表3.2-18、19と対応



表 3.2-21 中型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性

項目	高燃焼度化平衡期炉心	高燃焼度化導入期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	20ヶ月 (608日)	21ヶ月 (639日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	4/4 バッチ	←
炉心高さ	850 mm	←
軸ブランケット高さ (上/下)	120 mm / 50 mm	400 mm / 50 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側)	14.6 / 20.2 wt%	14.4 / 20.1 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	149.4 / 29.1 / 14.2 GWd/t	154.1 / 15.2 / 6.4 GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	98.8 GWd/t	63.2 GWd/t
燃焼反応度	2.84 % $\Delta k/k'$	2.77 % $\Delta k/k'$
増殖比 (全体)	1.043	1.171
(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.794 / 0.105 / 0.145	0.790 / 0.170 / 0.212
最大線出力 (内側/外側)	434 / 472 W/cm	427 / 462 W/cm
炉心平均出力密度	255 W/cm <sup>3</sup>	←
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.926 / 0.036 / 0.038	0.909 / 0.048 / 0.043
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$7.3 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$7.6 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	7.1 / 4.6 / - t	7.1 / 3.8 / 8.1 t
ブランケット/炉心重金属重量比	約0.6	約1.7
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.5 t/GWe	4.4 t/GWe
ポイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.4 \$ <sup>*6</sup>	7.6 \$ <sup>*6</sup>
ドップラー係数 [Tdk/dT] <sup>*5</sup> (平衡末期)	$-3.2 \times 10^{-3}$	$-3.3 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	3.32 m	←
遮へい体外接円径	5.40 m	←

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3:  $E > 0.1$  MeV、\*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、\*6: 実効遅発中性子割合 0.00356

表 3.2-22 中型コンパクト型導入期炉心の主要核特性

項目	導入期炉心	高燃焼度化導入期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	18ヶ月 (548日)	21ヶ月 (639日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	3/3 バッチ	4/4 バッチ
炉心高さ	850 mm	←
軸ブランケット高さ (上/下)	200 mm / 50 mm	400 mm / 50 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側)	13.3 / 19.0 wt%	14.4 / 20.1 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	101.7 / 13.1 / 7.5 GWd/t	154.1 / 15.2 / 6.4 GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	61.9 GWd/t	63.2 GWd/t
燃焼反応度	1.49 % Δk/kk'	2.77 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.141	1.171
(炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.851 / 0.137 / 0.153	0.790 / 0.170 / 0.212
最大線出力 (内側/外側)	431 / 470 W/cm	427 / 462 W/cm
炉心平均出力密度	255 W/cm <sup>3</sup>	←
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	0.932 / 0.036 / 0.032	0.909 / 0.048 / 0.043
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$3.6 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$5.1 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$7.6 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)	9.5 / 2.8 / 4.4 t	7.1 / 3.8 / 8.1 t
ブランケット/炉心重金属重量比	約0.8	約1.7
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.1 t/GWe	4.4 t/GWe
原子炉倍增時間	35年	31年
複合システム倍增時間 <sup>*4</sup>	53年	38年
ポイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.2 \$ <sup>*7</sup>	7.6 \$ <sup>*8</sup>
ドップラー係数 [Tdk/dT] <sup>*6</sup> (平衡末期)	$-3.7 \times 10^{-3}$	$-3.3 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	3.32 m	←
遮へい体外接円径	5.40 m	←

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

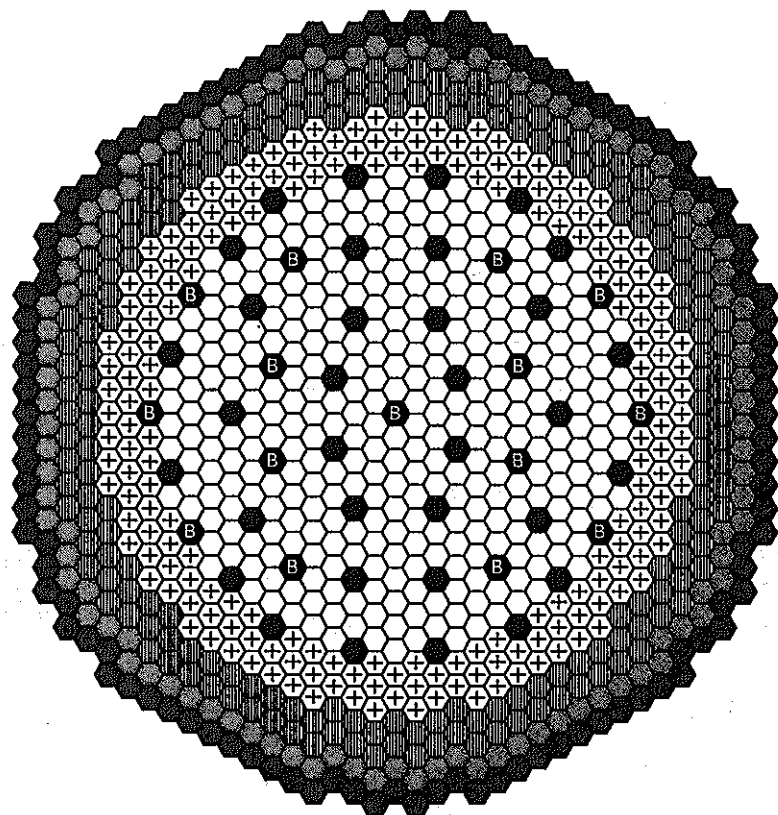
\*4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、\*5: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*6: 非均質補正 (1.05) 考慮、

\*7: 実効遅発中性子割合0.00361、\*8: 実効遅発中性子割合0.00356

表 3.2-23 中型コンパクト型炉心の TRU 組成変動による炉心特性の比較 (高燃焼度化導入期炉心)

項目	金属燃料高速炉多重リサイクル組成ケース	LWRからの回収TRU組成ケース	
		基準ケース	代表ケース
		LWR(45~49GWd/t)から4年冷却後に回収したTRU組成	A-LWR(80GWd/t)から4年冷却後に回収したTRU組成と40年間中間貯蔵したLWR(45~49GWd/t)から回収したTRU組成を5:5の割合で混合
燃料組成			
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/$ $^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{242m}\text{Am}/^{242}\text{Am}/^{243}\text{Am}/$ $^{242}\text{Cm}/^{243}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$	1.1 / 66.0 / 25.2 / 2.4 / 2.4 / 0.4 / 1.6 / 0.0 / 0.0 / 0.5 / 0.0 / 0.0 / 0.4 / 0.1	2.2 / 47.0 / 23.2 / 10.7 / 6.5 / 5.6 / 3.1 / 0.0 / 0.0 / 1.3 / 0.0 / 0.0 / 0.4 / 0.0	2.1 / 46.8 / 23.3 / 6.1 / 6.7 / 6.4 / 6.8 / 0.0 / 0.0 / 1.4 / 0.0 / 0.0 / 0.3 / 0.0
炉心部取出平均燃焼度	154 GWd/t	157 GWd/t	157 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>*1</sup>	63 GWd/t	64 GWd/t	64 GWd/t
Pu富化度 <sup>*2</sup> (内側炉心 / 外側炉心)	14.4 / 20.1 wt%	15.7 / 21.4 wt%	15.4 / 21.6 wt%
MA混入率 <sup>*2</sup> (平均)	0.5 wt%	2.1 wt%	3.1 wt%
Fertile含有率 <sup>*2</sup> (平均)	88.0 wt%	88.2 wt%	88.6 wt%
燃焼反応度	2.8 % $\Delta k/kk'$	3.3 % $\Delta k/kk'$	2.2 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体)	1.171	1.158	1.194
(炉心/軸ブランク / 径ブランク)	0.790 / 0.170 / 0.212	0.771 / 0.173 / 0.214	0.792 / 0.178 / 0.224
最大線出力 (内側炉心 / 外側炉心)	435 / 471 W/cm	453 / 476 W/cm	430 / 474 W/cm
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$3.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.4 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.4 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$7.6 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$7.6 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$7.6 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
初装荷Pu-インベントリ	4.4 t/GWe	4.3 t/GWe	4.1 t/GWe
炉心部ポイド反応度 <sup>*4</sup>	7.6 \$ <sup>5</sup>	7.9 \$ <sup>5</sup>	8.3 \$ <sup>5</sup>
ドップラ係数 $\beta_{\text{eff}}/d\beta/dT$ <sup>*4</sup>	$-3.3 \times 10^{-3}$	$-2.8 \times 10^{-3}$	$-2.6 \times 10^{-3}$
複合システム倍増時間 <sup>*6</sup>	38年	42年	34年

\*1: ブランク燃料を含む全体の平均燃焼度、\*2: Pu/HM, MA/HM, Fertile/HM、\*3: E > 0.1 MeV、\*4: 集合体内非均質効果考慮  
\*5: 実効遅発中性子割合 0.00356、\*6: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日



- |                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| 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)      | Zr-H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)     |

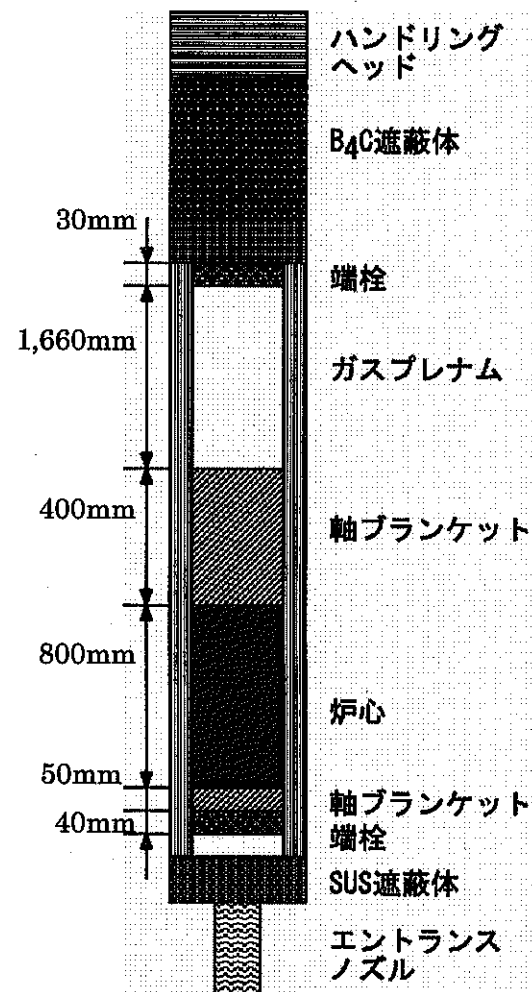


図 3.2-1 大型コンパクト型基準炉心 (高燃焼度化導入期炉心) の配置図

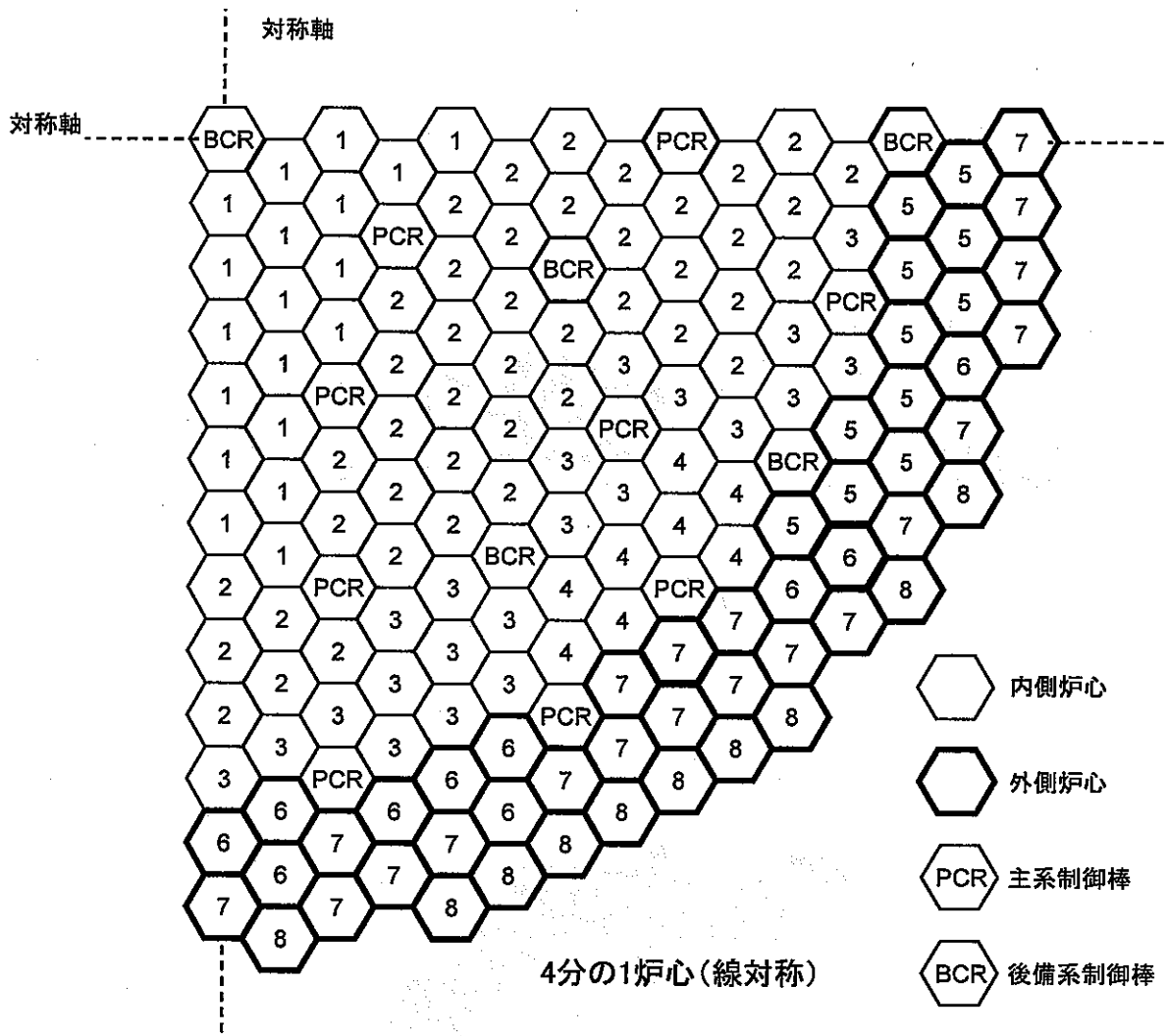
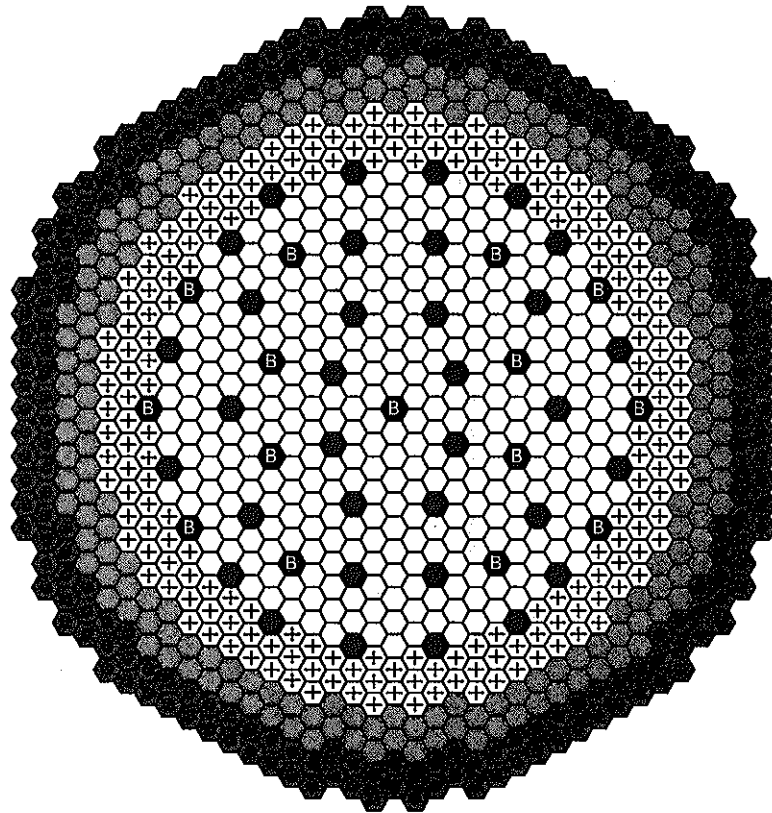


図 3.2-2 大型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の流量配分領域図



- |                  |                            |
|------------------|----------------------------|
| 内側炉心燃料集合体 (336体) | B <sub>4</sub> C遮蔽体 (210体) |
| 外側炉心燃料集合体 (198体) | 主系制御棒 (34体)                |
| ステンレス鋼遮蔽体 (186体) | 後備系制御棒 (15体)               |

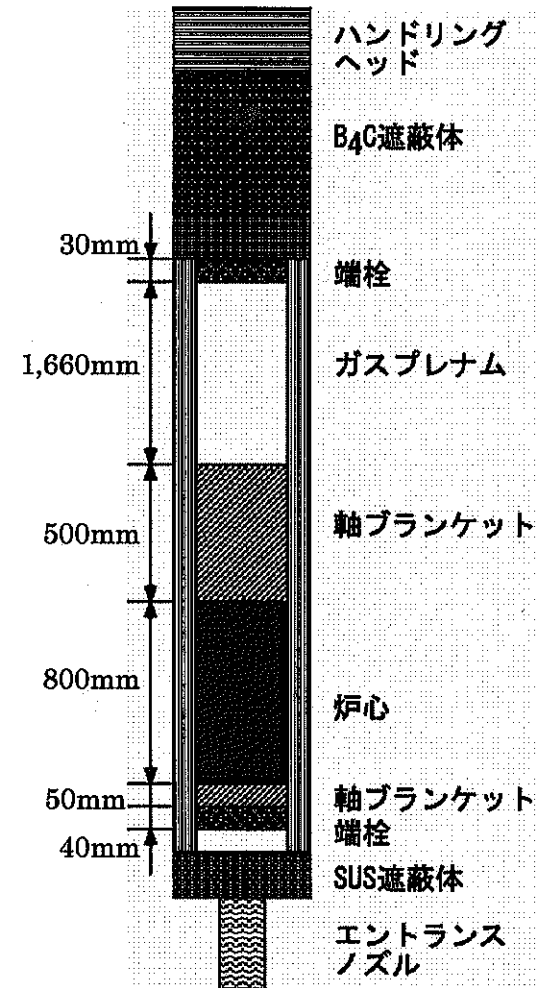


図 3.2-3 大型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の配置図

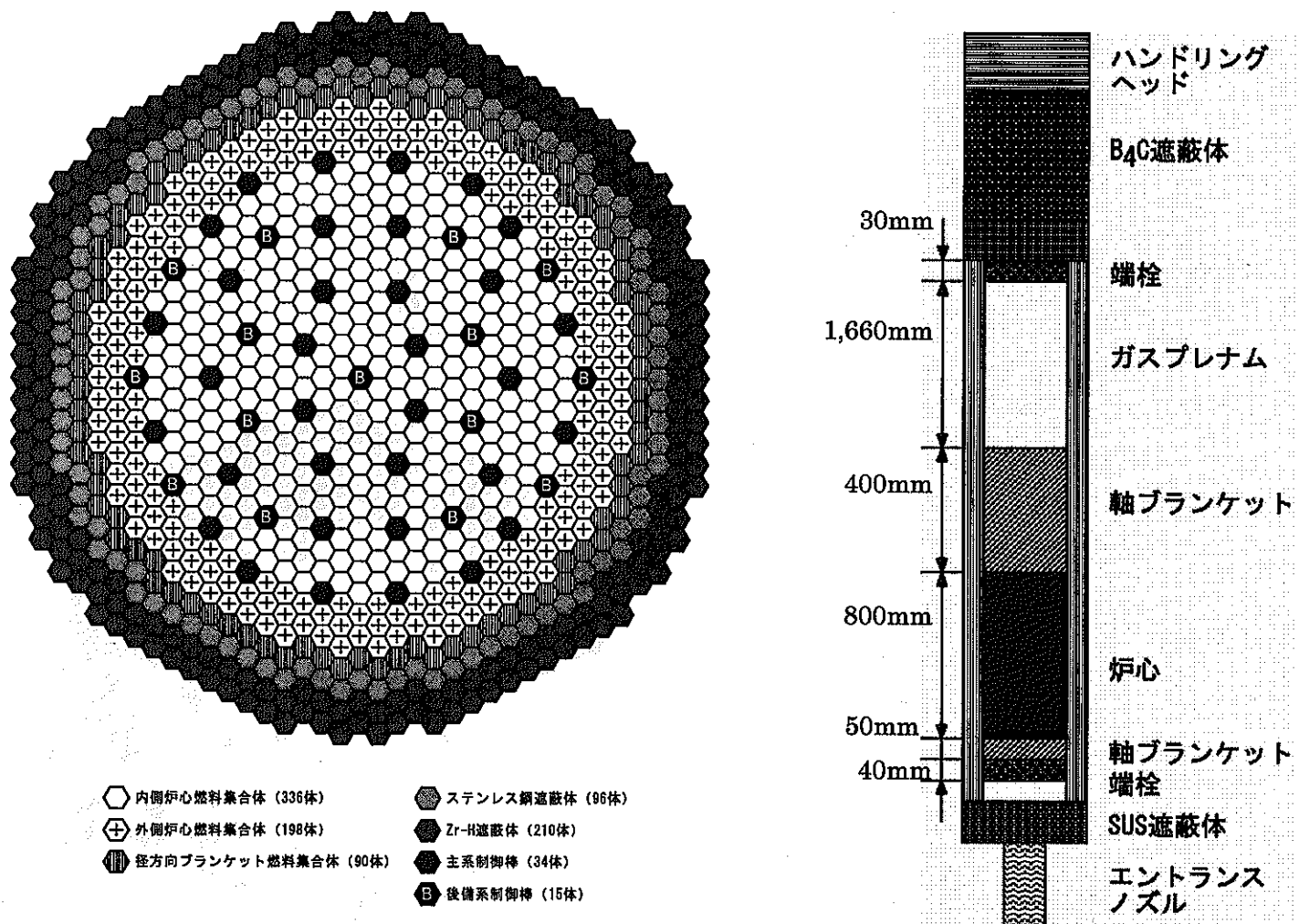


図 3.2-4 大型コンパクト型導入期炉心の配置図

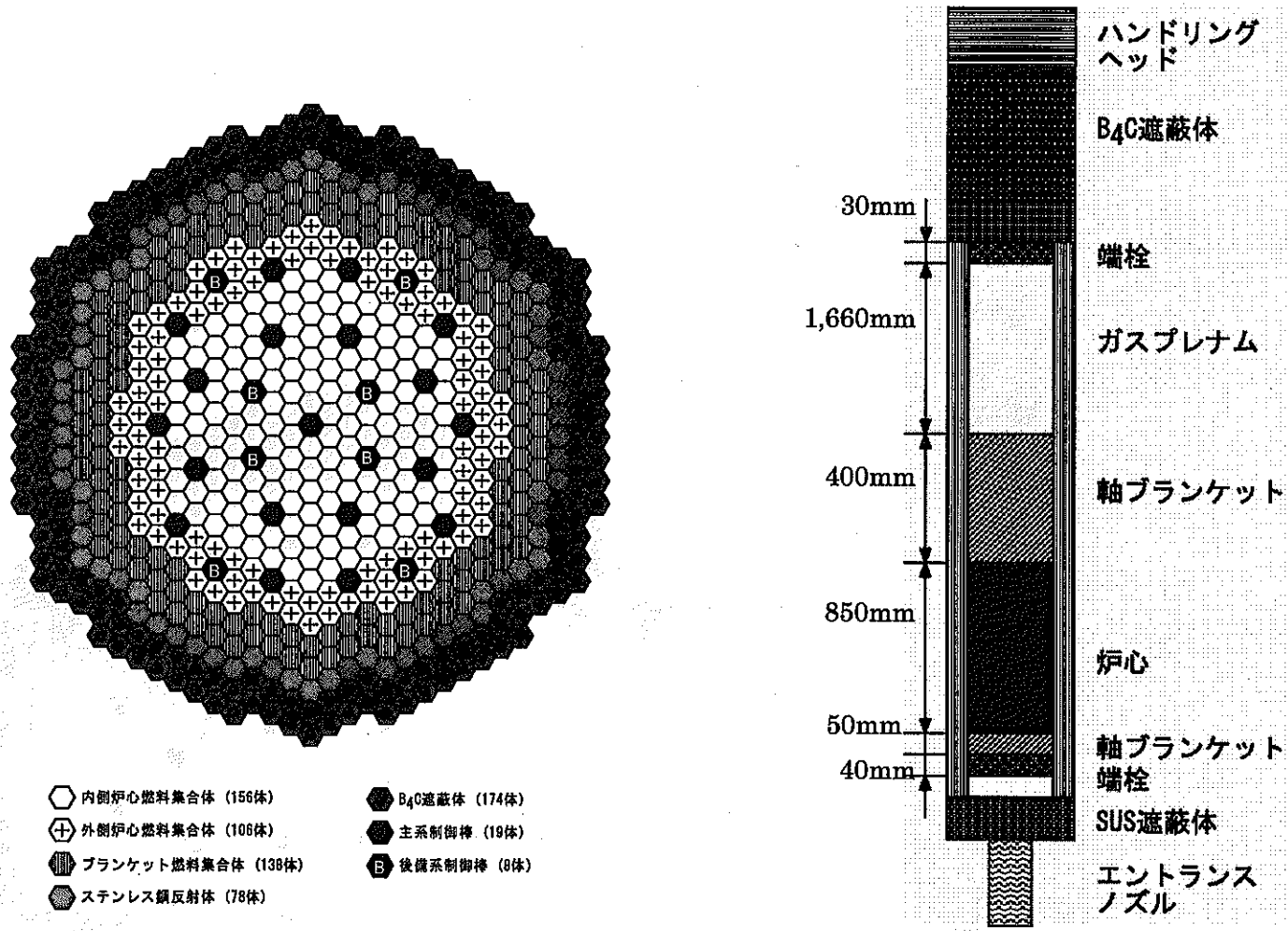


図 3.2-5 中型コンパクト型基準炉心（高燃焼度化導入期炉心）の炉心配置図



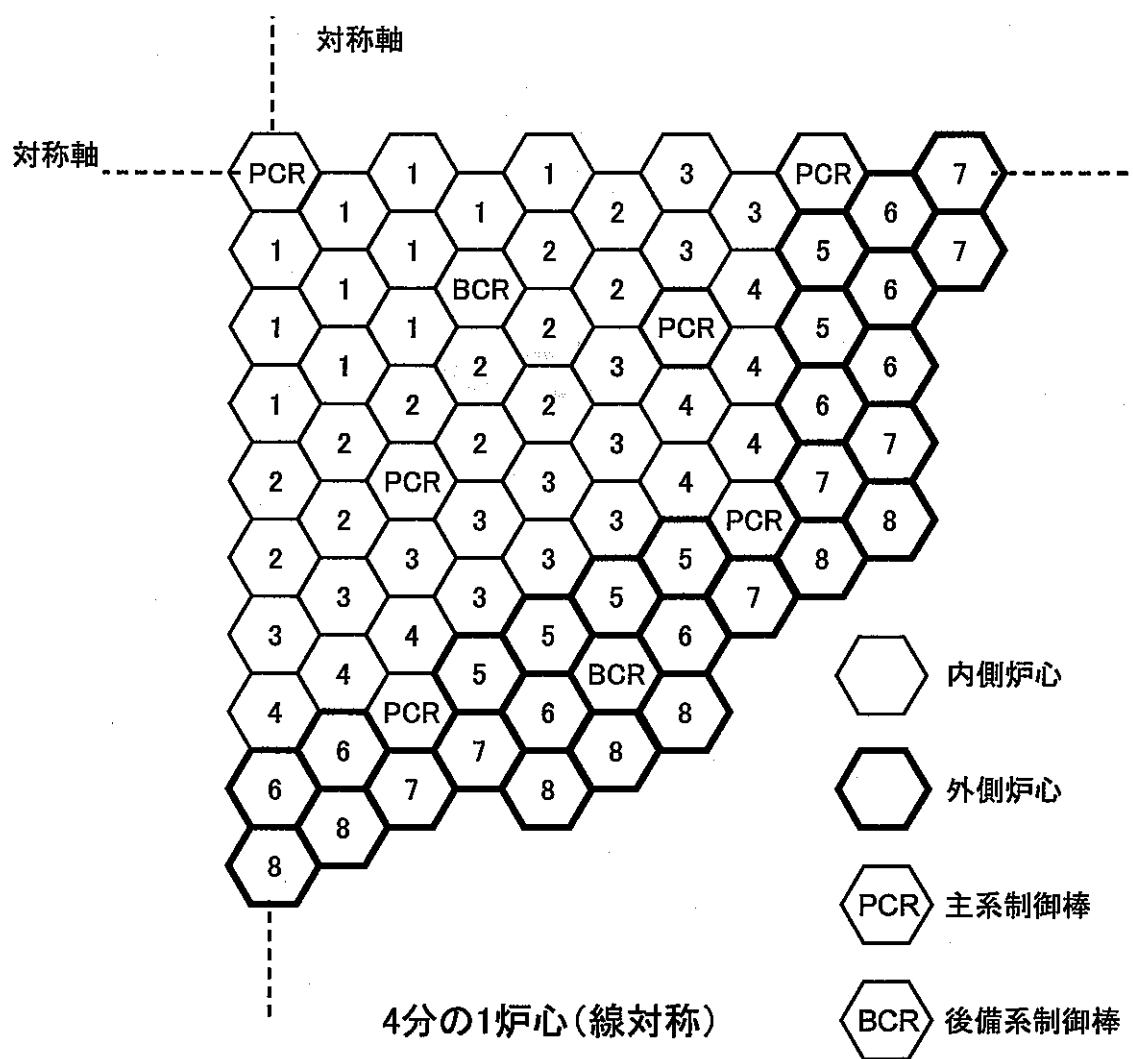
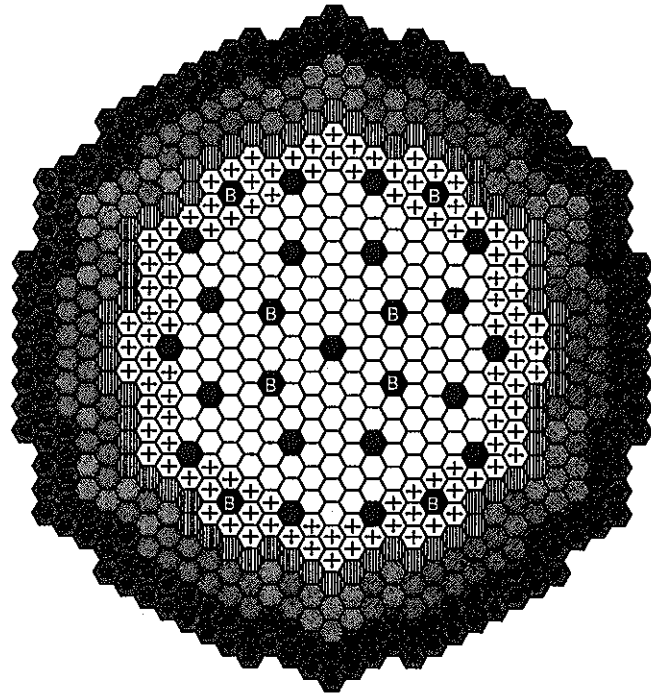


図 3.2-6 中型コンパクト型基準炉心(高燃焼度化導入期炉心)の流量配分領域図



- |                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| 内側炉心燃料集合体 (156体)  | B <sub>4</sub> C遮蔽体 (174体) |
| 外側炉心燃料集合体 (106体)  | 主系制御棒 (19体)                |
| ブランケット燃料集合体 (66体) | 後備系制御棒 (8体)                |
| ステンレス鋼反射体 (150体)  |                            |

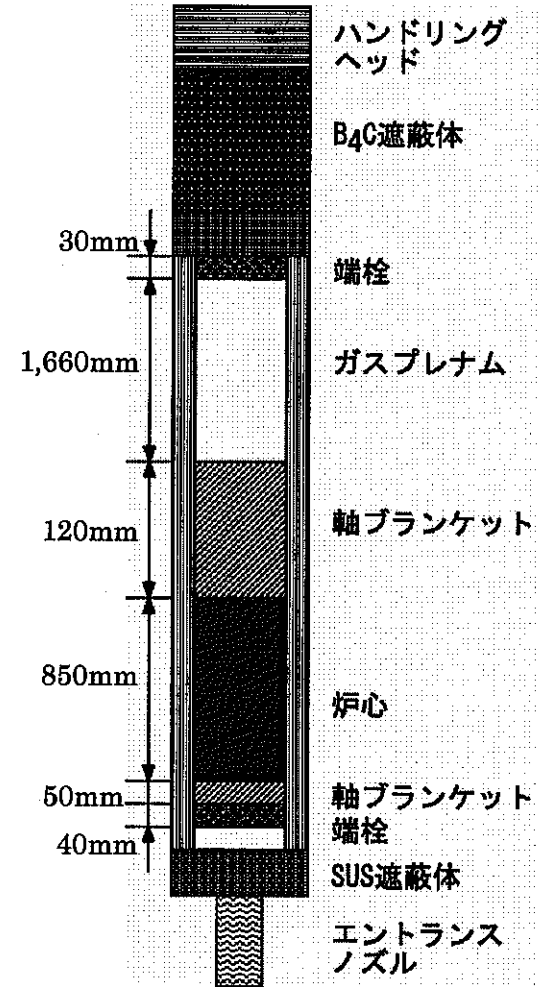


図 3.2-7 中型コンパクト型高燃焼度化平衡期炉心の炉心配置図

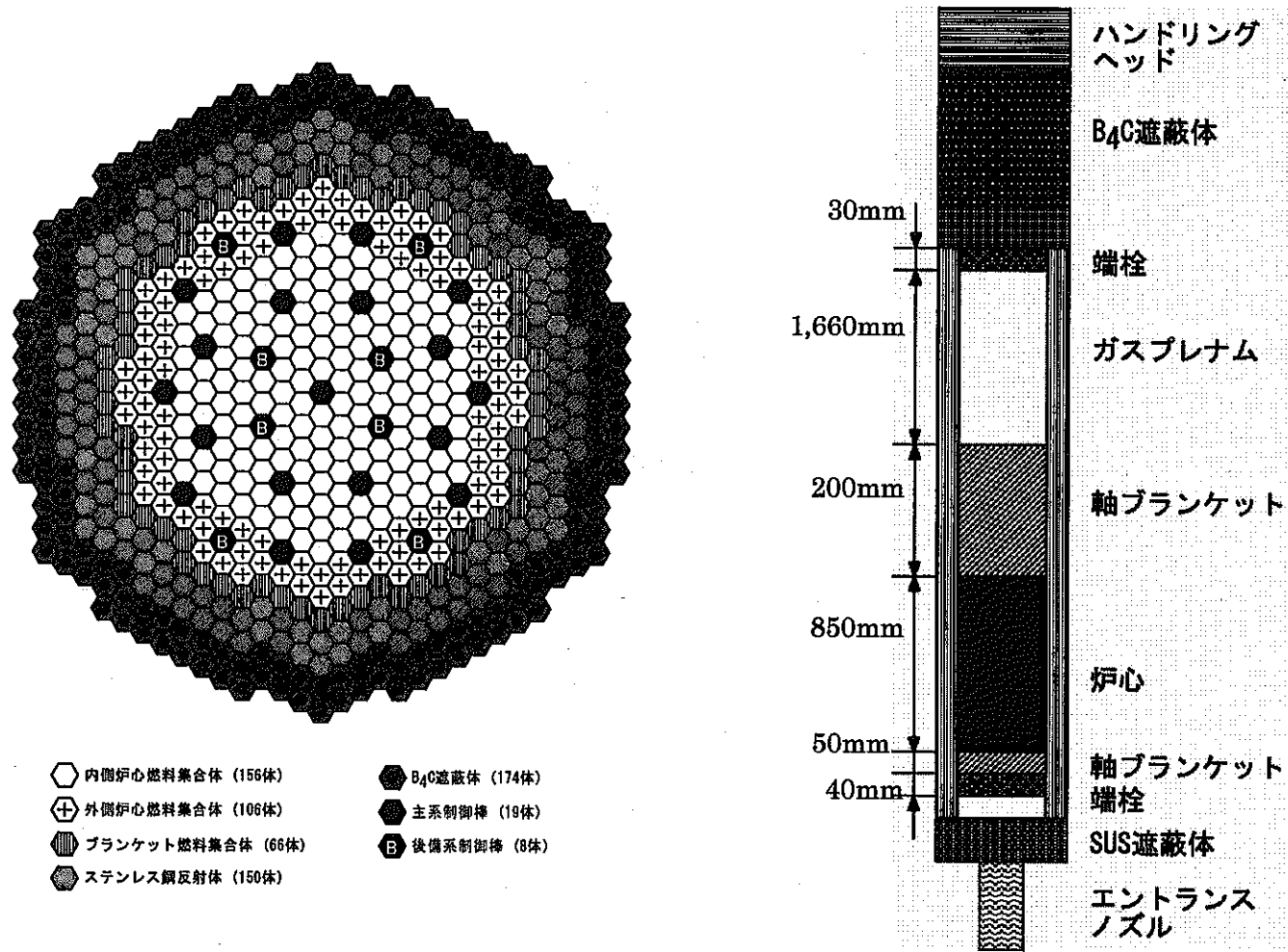


図 3.2-8 中型コンパクト型導入期炉心の炉心配置図

## 4. 高出口温度型炉心の概念検討

高出口温度型金属燃料炉心として、電気出力 750MWe、熱出力 1,785MWt を有する中型炉心、及び、電気出力 1,500MWe、熱出力 3,570MWt 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。

### 4.1 検討条件

#### (1) 核特性解析

解析条件は次の通りである。

- ・ 炉定数：高速炉用統合炉定数 ADJ2000R<sup>(6)</sup> (JFS-3 型式 70 群)
- ・ 随伴 FP 量：0.6vol% (ANL の金属電解法再処理を想定)
- ・ 随伴 FP の取扱い：Nd-143 で代表させ、FP 等価係数 1.0 を適用 (ANL の金属電解法再処理を想定)
- ・ 燃焼特性：2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散燃焼計算により算出
- ・ ナトリウムボイド反応度：基準状態に対し炉心部のラッパ管内のナトリウムをボイド化し、2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (0.96) を考慮
- ・ ドップラー係数：基準状態に対し炉心部の重金属核種のみを昇温させ、2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (1.05) を考慮
- ・ 最大線出力、最大高速中性子照射量：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・ 熱特性解析用出力分布：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・ 制御棒価値計算：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出し、輸送補正 (0.96)、メッシュ補正 (1.07)、群縮約補正 (0.97)、ランピング効果 (制御棒干渉効果の過度の保守性を排除するためにランピング効果 0.77 となるように B<sub>4</sub>C 原子数密度を希釈)、不確かさ (3σ で 9%) を考慮

#### (2) 熱特性解析

核計算で得られた 3次元出力分布を基に熱特性解析を行う。被覆管温度計算においては、サブチャンネル解析モデルを適用した。なお、流量配分計画策定においては、原子炉出入口温度条件と流量条件を満足させ、被覆管内面最高温度の制限からの超過を定量的に求めることとした。

- ・ 1次系流量：18,200kg/s (大型炉心)、9,083kg/s (中型炉心)  
(炉心領域に配分できる流量として 1次系流量の 96%を想定)
- ・ 原子炉出口/入口温度：550°C/395°C
- ・ 被覆管内面最高温度制限：650°C (液相形成防止)
- ・ 工学的安全係数：表 3.2-1 に示すとおり (実証炉設計研究で使用された係数に対し、各部製造公差とスラグ偏心効果を ANL の製造実績に基づき見直し)
- ・ 圧力損失評価式：Cheng-Todreas 式<sup>(6)</sup>
- ・ 流量領域：最大 8 領域程度 (従来設計研究と同様)
- ・ スペーサ形式：ワイヤ型

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。

### (3) 燃料健全性解析 (中型炉心のみ)

熱特性解析において得られた燃料要素の出力と被覆管肉厚中心温度の履歴に基づき、被覆管の内面及び外面の腐食、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、燃料健全性評価を行う。

- ・材料特性評価式：クリープ強度 ODS 鋼暫定評価式<sup>(7)</sup>
- 内面腐食 ODS 鋼暫定評価式
- 外面腐食 ODS 鋼暫定評価式<sup>(7)</sup>

### (4) 柔軟性評価

基準炉心である平衡期炉心を基本とし、①増殖性能への柔軟性評価 (導入期炉心の構築)、②炉心部取出平均燃焼度への柔軟性 (高燃焼度化炉心の構築) を行う。具体的には、核特性解析を行うことにより核特性への影響の定量的評価、あるいは、設計対応の可否の評価を行う。

## 4.2 検討結果

### 4.2.1 中型炉心

#### (1) 核特性評価結果

まず、基本仕様設定のためのサーベイを実施した。2002 年度に設定した基準炉心はピン径 2 領域型であり、内側炉心と外側炉心の燃料のピン径はそれぞれ 8.0mm、8.5mm であった。その仕様に対し、外側炉心の燃料仕様は変更せずに、内側炉心の燃料ピン径を外側炉心と同じ 8.5mm とし、内側炉心と外側炉心の重金属密度比が 2002 年度炉心と同等となるように内側炉心燃料の Zr 含有率を調整する。そのような考えの下、設定した炉心を表 4.2-1 に示すが、内側炉心燃料の Zr 含有率は 14.4wt% となった。ナトリウムボイド反応度は 2002 年度炉心の 8.3% に対し、6.6% と大幅に改善され、Zr 含有率多領域型概念の有効性が改めて分かる。なお、ナトリウムボイド反応度が制限目標に対して余裕があることから、以降のサーベイでは炉心高さを 95cm から 100cm へ増加させることとした。なお、ナトリウムボイド反応度の観点からは、炉心高さの更なる増加は可能であるが、増殖比 1.04 程度の条件では炉心径の縮小が必要であり、その場合出力分布勾配が大きくなることによる熱特性への悪化が懸念されるため、これ以上の炉心高さ増加は図らない。

次に、詳細仕様設定のためのサーベイを行った。このサーベイでは、炉心サイズ一定 (燃料集合体数と炉心高さ一定) で外側炉心燃料の Zr 含有率を 10wt% に固定し、熱特性の目安となる包絡熱出力が最小となる最適な内側炉心の燃料集合体数、及び、内側炉心の Zr 含有率を設定する。詳細サーベイの結果を表 4.2-2 に示すが、増殖比 1.04 の条件で包絡熱出力が最小となるのは、内側炉心 159 体で内側炉心燃料の Zr 含有率が 16.0wt% の場合であることが分かる。

以上のサーベイで設定した基準炉心の主要燃料仕様を表 4.2-3 に、炉心配置を図 4.2-1 にそれぞれ示す。

さて、ここで燃料製造性の観点から金属燃料の融点について触れておく。本炉心概念では、Pu 富化度は 12wt% 程度となるが、Zr 含有率が 10wt% である外側炉心燃料の融点は 1,140°C 前後であるのに対し、Zr 含有率が 16wt% である内側炉心燃料の融点は 1,240°C 前後と 100°C 程度上昇することが予想される。1,240°C の融点はブランケット燃料 (Zr 含有率

10wt%) の融点と同等であることから、現在燃料製造側で想定されている設備で対応可能な範囲であると考えられる。ただし、ブランケットと異なり Pu を含んでいることや再処理側への影響（金属燃料の溶解や Zr 回収過程への影響等）については今後検討を行う必要がある。

引き続き、設定した基準炉心について、詳細な核特性解析を行った。基準炉心の主要炉心核特性を表 4.2-4 に、物量収支を表 4.2-5 に、制御反応度収支を表 4.2-6 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 27 ヶ月、増殖比 1.03、ナトリウムボイド反応度 6.7%、炉心部取出平均燃焼度 94GWd/t、最大高速中性子照射量  $5.2 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) であり、炉心部取出平均燃焼度を除いて設計条件を満足している。装荷時核分裂性 Pu 重量は 5.5t/GWe となった。制御反応度収支については成立が確認できる。

## (2) 熱特性解析

内側炉心 2 領域、外側炉心 8 領域の計 10 領域とし、出入口温度は 550/395°C の条件で、流量条件を満足するよう流量配分を行った。流量配分結果を表 4.2-7 に、流量領域区分を図 4.2-2 にそれぞれ示す。被覆管内面最高温度は最大で 659°C に達し、制限を 9°C 超過する結果となったが、工学的安全係数の合理化等により改善の見通しはあると考えられる。バンドル部圧力損失は最大で 0.22MPa であり、制限の 0.2MPa 程度以下を満足している。

燃料健全性評価用データとして、流量領域毎の代表燃料要素の出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴をそれぞれ表 4.2-8、表 4.2-9 の通り求めた。

## (3) 燃料健全性解析

得られた出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴を用いて、燃料健全性評価を行った。評価対象とした流量領域は、FP ガス放出による内圧上昇等の観点から平均出力が最大（寿命末期燃焼度が最大）である領域と、被覆管内外面腐食量等の観点から平均温度と寿命末期温度が最大となる領域とした。燃料健全性の評価結果を表 4.2-10 に示す。寿命末期の被覆管周方向応力は最大で 119.4MPa であり F/S で暫定的に設定した制限目安 120MPa 以下（高速中性子照射量制限目安満足炉心）を満足している。寿命末期において、CDF は最大で 0.07 であり制限の 0.5 以下を満足している。以上のように、燃料健全性の成立性が確認できた。

## (4) 柔軟性評価

### ① 増殖性能

平衡期炉心に対し、高さ 10cm の上部軸ブランケットの付加により、増殖比 1.1 程度の導入期炉心を構築した。設定した炉心の配置を図 4.2-3 に、主要炉心特性を表 4.2-11 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 27 ヶ月、増殖比 1.10、ナトリウムボイド反応度 6.9%、炉心部取出平均燃焼度 92GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 85GWd/t、最大高速中性子照射量  $5.2 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) であり、炉心部取出平均燃焼度を除いて設計条件を満足している。複合システム倍増時間は 85 年となった。

### ② 炉心部取出平均燃焼度

基準炉心では、ナトリウムボイド反応度と遮へい体外接円径において設計条件に対する余裕が見られるため、炉心高さと炉心径の拡大により、ブランケットの付加なしで増殖比 1.04 程度を満足する高燃焼度化炉心の構築を試みた。その結果、炉心高さを 100cm から

115cmに拡大し、燃料集合体数を393体から456体に増加させることにより、所要の炉心を構築することができた。主要核特性を表4.2-12に、炉心配置を図4.2-4にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ28ヶ月、増殖比1.03、ナトリウムボイド反応度7.8\$, 炉心部取出平均燃焼度146GWd/tであり、設計条件を満足している。なお、最大高速中性子照射量は $7.4 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ )に達しており、設計目標目安の $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ を超過している。

## 4.2.2 大型炉心

### (1) 核特性評価結果

中型炉心は271本ピン燃料集合体393体で構成されているが、出力が2倍である大型炉心を271本ピン集合体で構成した場合には、燃料集合体数は800体近くとなることは自明であり、燃料取り扱い側への影響が大きいことが懸念される。そこで、大型炉心については331本ピン燃料集合体により炉心を構築することとする。また、Zr含有率と炉心高さについては、中型炉心で設定した仕様とすることとした。

まず、中型炉心と相似でインベントリを約2倍とした大型炉心の構築結果を表4.2-13に示すが、増殖比は約1.07となり、炉心サイズ縮小の余地があることが分かる。また、包絡熱出力は中型炉心と比較して悪化が見られており、その最適化には内側炉心と外側炉心の割合の調整が必要であることが分かる。

次に、炉心径と内側炉心割合に関するサーベイを行った。炉心径については、中型炉心に対して単純にインベントリを2倍とした炉心では、燃料集合体数は642体で増殖比が目標に対して過大評価であったため、サーベイでは588体、558体、528体の燃料集合体で構成される炉心を扱った。そして、それぞれの炉心について、内側炉心集合体数をパラメータとしてサーベイを行った。サーベイの結果を表4.2-14、及び、図4.2-5に示す。ここで、528体炉心の結果は588体炉心と558体炉心の結果の外挿推測値であり、実際には包絡熱出力はより悪化することが予想される。サーベイ結果より、増殖比が1.03~1.04において、包絡熱出力が最も小さくなるのは558体炉心であり、内側炉心の割合を40~44%程度とすれば最適化条件となることが分かる。以上のサーベイ結果を基に設定した大型基準炉心の燃料仕様を表4.2-15に、炉心配置を図4.2-6にそれぞれ示す。本炉心は、燃料集合体数555体で、内側炉心割合は45%としている。

引き続き、設定した基準炉心について、詳細な核特性解析を行った。基準炉心の主要炉心核特性を表4.2-16に、物量収支を表4.2-17に、制御反応度収支を表4.2-18にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ23.1ヶ月、増殖比1.03、ナトリウムボイド反応度7.6\$, 炉心部取出平均燃焼度94GWd/t、最大高速中性子照射量 $5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ )であり、炉心部取出平均燃焼度と遮へい体外接円径を除いて設計条件を満足している。装荷時核分裂性Pu重量は4.7t/GWeとなった。制御反応度収支については成立が確認できる。

### (2) 熱特性解析

内側炉心3領域、外側炉心7領域の計10領域とし、出入口温度は550/395°Cの条件で、流量条件を満足するよう流量配分を行った。流量配分結果を表4.2-19に、流量領域区分を図4.2-7にそれぞれ示す。被覆管内面最高温度は最大で655°Cに達し、制限を5°C超過する結果となったが、工学的安全係数の合理化等により改善の見通しはありと考えられる。また、中型炉心と比較して、出力分布が若干平坦化されていることと、331本ピンバンドルの採用による冷却材周辺流れ効果の低減により、被覆管最高温度は4°C程度改善されているこ

とが分かる。バンドル部圧力損失は最大で 0.20MPa であり、制限の 0.2MPa 程度以下を満足している。

#### (4) 柔軟性評価

##### ①増殖性能

平衡期炉心に対し、高さ 10cm の上部軸ブランケットを付加することにより、増殖比 1.1 程度の導入期炉心を構築した。設定した炉心の配置を図 4.2-8 に、主要炉心特性を表 4.2-20 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 23.1 ヶ月、増殖比 1.10、ナトリウムボイド反応度 7.9%、炉心部取出平均燃焼度 93GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 85GWd/t、最大高速中性子照射量  $5.1 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) であり、炉心部取出平均燃焼度と遮へい体外接円径を除いて設計条件を満足している。複合システム倍増時間は 76 年となった。

##### ②炉心部取出平均燃焼度

中型炉心の場合と異なり、大型基準炉心では、ナトリウムボイド反応度は制限目標に対して 0.4% の余裕しかなく、遮へい体外接円径も取り合い条件を既に超過しているため、高さ 17cm の上部軸ブランケットを付加し、ナトリウムボイド反応度 8% 以下を満足させるために炉心高さを 100cm から 95cm に縮小することにより炉心を構築した。主要核特性を表 4.2-21 に、炉心配置を図 4.2-9 にそれぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 22 ヶ月、増殖比 1.04、ナトリウムボイド反応度 7.8%、炉心部取出平均燃焼度 152GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 131GWd/t であり、遮へい体外接円径を除いて設計条件を満足している。また、最大高速中性子照射量は  $7.4 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) に達している。

#### 4.3 まとめ

ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心と同等の原子炉出入口温度 (550°C/395°C) を達成する大型及び中型高出口温度型炉心を構築した。高出口温度が金属燃料炉心の新しい出力分布平坦化方策として、従来のピン径の多段階化による方法から、ピン径を単一として燃料の Zr 含有率を多段階化する方法を適用し、炉心概念を構築した。新しい方策の導入は以前のピン径多領域型炉心において課題とされていたナトリウムボイド反応度の低減に非常に有効であり、それに伴う設計範囲の拡大を炉心のコンパクト化に充て、炉心インベントリの低減に資することができた。また、構築した炉心は、炉心部取出平均燃焼度を除いて、ほぼ設計条件、設計目標も満足している。大型炉心については遮へい体外接円径の取り合い条件を約 10cm 超過する結果となったが、Zr 含有率を内側/外側炉心共により低下させることにより、条件を満足できる見込みである。装荷時核分裂性 Pu 重量は中型炉心で 5.5t/GWe、大型炉心で 4.7t/GWe となり、コンパクト型炉心と比較すれば、早期導入性の観点からは不利となっている。

熱特性解析として、原子炉出口/入口温度 550/395°C の条件で冷却材流量配分計画を策定した。その結果、被覆管内面最高温度について、中型炉心では 659°C、大型炉心では 655°C といずれも制限の 650°C を超過する結果となったが、工学的安全係数の合理化等により満足できる範囲内であると考えられる。また、策定した流量配分計画の下、定常時の燃料健全性評価を行い、健全性が担保されていることを確認した。



柔軟性評価については、①炉心部取出平均燃焼度、②増殖性能に関して行った。①炉心部取出平均燃焼度に関しては、高速中性子照射量設計目標目安の伸長を前提とし、炉心部取平均燃焼度 150GWd/t を満足する炉心を構築した。中型炉心については、ブランケットの付加なしで炉心の拡大のみにより設計条件を満足できる炉心が構築できた。大型炉心については、ナトリウムボイド反応度の観点から上部軸ブランケットの付加を行ったが、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は約 130GWd/t とすることができた。②増殖性能については、上部軸ブランケットの付加のみにより導入期炉心を構築することができた。

表 4.2-1 中型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様基本サーベイ結果

項目		2002年度基準炉心	基本仕様サーベイ	
炉心仕様	運転サイクル長さ(ヶ月)	24	←	
	炉心高さ(mm)	950	←	
	集合体数(内側/外側炉心)	159/234	←	
	遮へい体外接円径(m)	5.30	5.24	
燃料要素	被覆管外径(内側/外側炉心)(mm)	8.0/8.5	8.5/8.5	
	被覆管内径(内側/外側炉心)(mm)	7.06/7.50	7.50/7.50	
	被覆管肉厚(内側/外側炉心)(mm)	0.47/0.50	0.50/0.50	
	燃料ピン本数	271	←	
	Zr含有率(内側/外側炉心)(wt%)	10.0/10.0	14.4/10.0	
集合体	燃料ピン配列ピッチ(mm)	9.70	9.55	
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比(P/D)	—	1.12	
	ラッパ管外対面間距離(mm)	171.3	169.5	
	ラッパ管内対面間距離(mm)	161.3	159.5	
	ラッパ管肉厚(mm)	5.0	←	
	ラッパ管間ギャップ(mm)	5.5	←	
	集合体配列ピッチ(mm)	176.8	175.0	
	ワイヤ径(mm)	—	1.00	
	ワイヤ巻き付けピッチ(mm)	—	200	
	体積比(%)	燃料	42.2	45.1
		構造材	22.6	24.3
冷却材		35.1	30.5	
核特性	Pu富化度(wt%)	12.2	12.1	
	増殖比	1.032	1.037	
	炉心部取出平均燃焼度(GWd/t)	88	88	
	Naボイド反応度(平衡末期)( $\beta$ )	8.3	6.6	
備考		—	2002年度基準炉心に対し出力分布平坦化方策とスペーサタイプを変更	

※最大バンドル部圧力損失を保存

表 4.2-2(1) 中型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様詳細サーベイ結果 —増殖比—

		内側炉心集合体数(全炉心中割合(%))			
		120 (30.5)	159 (40.5)	195 (49.6)	237 (60.3)
内側炉心 Zr含有率 [wt%]	14.4	1.072	1.062	1.051	1.041
	15.2	—	1.051	1.040	—
	16.0	1.060	<b>1.040</b>	—	—
	17.2	1.051	—	—	—
	18.4	1.041	—	—	—

表 4.2-2(2) 中型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様詳細サーベイ結果 —規格化包絡熱出力—

		内側炉心集合体数(全炉心中割合(%))			
		120 (30.5)	159 (40.5)	195 (49.6)	237 (60.3)
内側炉心 Zr含有率 [wt%]	14.4	1.053	1.052	1.054	1.062
	15.2	—	1.047	1.050	—
	16.0	1.048	<b>1.043</b>	—	—
	17.2	1.047	—	—	—
	18.4	1.047	—	—	—

※2002年度基準炉心の規格化包絡熱出力:1.052

表 4.2-3 中型高出口温度型炉心の主要燃料仕様

項目	仕様				
	炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット		
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr	なし	
	被覆管材料	ODS鋼			
	被覆管外径 (mm)	8.5			
	被覆管内径 (mm)	7.5			
	被覆管肉厚 (mm)	0.5			
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,720			
	ボンド材	ナトリウム			
	燃料スミア密度 (%TD)	75	←		
	Zr含有率 (wt%)	10以上	10		
	集合体	燃料ピン本数 (本)	271		なし
燃料ピン配列ピッチ (mm)		9.55			
燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)		1.12			
ラッパ管材料		PNC-FMS鋼			
ラッパ管外対面間距離 (mm)		169.5			
ラッパ管内対面間距離 (mm)		159.5			
ラッパ管肉厚 (mm)		5			
ラッパ管間ギャップ (mm)		5.5			
集合体配列ピッチ (mm)		175.0			
ワイヤ径 (mm)		1.00			
ワイヤ巻き付けピッチ (mm)		200			
体積比 (%)		燃料 (実効)	45.1 (33.9)	←	
		構造材	24.3	←	
	冷却材	30.5	←		

表 4.2-4 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の主要炉心核特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	27ヶ月 (821日)
燃料交換バッチ数 (炉心)	3 バッチ
炉心高さ	1,000 mm
軸ブランケット高さ(上)	0 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup>	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	16.0 / 10.0 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	93.8 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	93.8 GWd/t
燃焼反応度	0.58 % $\Delta k/k'$
増殖比 (全体)	1.032
(炉心/軸方向ブランケット)	1.032 / -
最大線出力 (内側/外側)	256 / 279 W/cm
炉心平均出力密度	164 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$2.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$5.2 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	15.7 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	5.5 t/GWe
ポイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期)	6.7 \$ <sup>*5</sup>
ドップラー係数 $[\Delta k/dT]$ <sup>*5</sup> (平衡末期)	$-4.2 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	3.72 m
遮へい体外接円径	5.24 m

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

\*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、

\*6: 実効遅発中性子割合0.00358

表 4.2-5(1) 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支  
 -1バッチ当たり平衡装荷及び取出燃料-

核種	平衡装荷			平衡取出		
	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	15.0	26.0	41.0	4.2	11.6	15.8
U-236	0.0	0.0	0.0	1.9	2.7	4.6
U-238	4,979.5	8,634.1	13,613.6	4,246.0	7,792.6	12,038.6
U合計	4,994.5	8,660.1	13,654.6	4,252.1	7,806.9	12,059.0
Np-237	2.9	5.0	7.9	3.5	6.1	9.6
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.8	0.9	1.7
Np合計	2.9	5.0	7.9	4.3	7.0	11.3
Pu-238	7.9	13.6	21.5	8.1	14.4	22.5
Pu-239	471.1	816.8	1,287.9	483.5	835.6	1,319.1
Pu-240	179.9	311.9	491.8	196.3	326.0	522.3
Pu-241	17.1	29.7	46.8	24.9	36.9	61.8
Pu-242	17.1	29.7	46.8	16.1	27.7	43.8
Pu合計	693.1	1,201.7	1,894.8	728.9	1,240.6	1,969.5
Am-241	11.4	19.8	31.2	8.9	18.8	27.7
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.7	1.1	1.8
Am-243	3.6	6.2	9.8	4.1	6.8	10.9
Am合計	15.0	26.0	41.0	13.7	26.7	40.4
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	1.2
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
Cm-244	2.9	5.0	7.9	3.8	6.0	9.8
Cm-245	0.7	1.2	1.9	0.7	1.2	1.9
Cm合計	3.6	6.2	9.8	5.1	8.0	13.1
合計	5,709.1	9,899.0	15,608.1	5,004.1	9,089.2	14,093.3
FP <sup>*1</sup>	19.8	29.1	48.9	19.8	29.1	48.9
FP <sup>*2</sup>	0.0	0.0	0.0	706.4	812.8	1,519.2
FP合計	19.8	29.1	48.9	726.2	841.9	1,568.1

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 4.2-5(2) 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支  
 —平衡初期及び末期燃料—

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	60.8	92.0	20.4	46.5	66.9
U-236	2.7	3.4	6.1	4.6	6.0	10.6
U-238	14,178.1	25,039.7	39,217.8	13,444.6	24,198.2	37,642.8
U合計	14,212.0	25,103.9	39,315.9	13,469.6	24,250.7	37,720.3
Np-237	9.4	16.2	25.6	10.0	17.3	27.3
Np-239	1.7	2.0	3.7	2.5	2.9	5.4
Np合計	11.1	18.2	29.3	12.5	20.2	32.7
Pu-238	23.6	41.1	64.7	23.9	41.8	65.7
Pu-239	1,450.2	2,488.7	3,938.9	1,462.6	2,507.5	3,970.1
Pu-240	557.4	950.3	1,507.7	573.8	964.4	1,538.2
Pu-241	61.4	98.0	159.4	69.2	105.1	174.3
Pu-242	49.8	86.8	136.6	48.8	84.8	133.6
Pu合計	2,142.4	3,664.9	5,807.3	2,178.3	3,703.6	5,881.9
Am-241	30.6	57.7	88.3	28.1	56.7	84.8
Am-242m	1.0	1.4	2.4	1.7	2.5	4.2
Am-243	11.3	19.3	30.6	11.9	19.9	31.8
Am合計	42.9	78.4	121.3	41.7	79.1	120.8
Cm-242	1.2	1.4	2.6	1.7	2.2	3.9
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
Cm-244	9.6	15.9	25.5	10.5	16.9	27.4
Cm-245	2.1	3.6	5.7	2.1	3.5	5.6
Cm合計	13.0	21.0	34.0	14.4	22.7	37.1
合計	16,421.4	28,886.4	45,307.8	15,716.5	28,076.3	43,792.8
FP <sup>*1</sup>	59.4	87.4	146.8	59.4	87.4	146.8
FP <sup>*2</sup>	707.7	814.0	1,521.7	1,414.1	1,626.9	3,041.0
FP合計	767.1	901.4	1,668.5	1,473.5	1,714.3	3,187.8

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 4.2-6 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）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	1.8	0.3	0.5
a)出力補償	0.5	0.3	0.5
b)燃焼補償	0.8		
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 $\sigma$ )	0.5	0.1	0.1
a)臨界性予測誤差	0.0		
b)出力補償予測誤差		0.1	0.1
c)燃料製作公差	0.5		
d)燃料交換余裕	0.2		
3.事故時投入反応度		0.2	0.2
4.最小反応度停止余裕	0.4		
必要制御反応度	2.7	0.6	0.7
補正後制御棒価値	3.5	0.8	1.2
反応度停止余裕	0.8	0.2	0.5

単位:% $\Delta k/kk'$



表 4.2-7 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の流量配分結果

炉心領域	流量領域	集合体数	集合体 最大出力	集合体流量	必要 領域流量	被覆管内面 最高温度 <sup>*2</sup>	バンドル部 圧力損失
			[MW]	[kg/s]	[kg/s]	[°C]	[MPa]
内側炉心	1	111	5.64	24.7	2741.7	657	0.19
	2	48	5.27	23.4	1123.2	658	0.17
外側炉心	3	36	5.95	26.6	957.6	658	0.22
	4	36	5.46	24.8	892.8	659	0.19
	5	42	4.89	22.6	949.2	659	0.16
	6	21	4.31	20.5	430.5	659	0.14
	7	39	3.81	18.5	721.5	659	0.11
	8	15	3.35	16.9	253.5	659	0.10
	9	33	2.85	14.9	491.7	659	0.08
	10	12	2.43	13.1	157.2	658	0.06
合計(最大値)	—	393	1907.7	(26.6)	8718.9	(659)	(0.22)
					炉心流量 <sup>*1</sup> [kg/s]	8719.7	
					余剰流量 [kg/s]	+0.8 (+0.0%)	

\*1: 1次系流量の内、96%を燃料集合体冷却用に配分

\*2: HSF計算結果:1.23、周辺流れ効果係数計算結果:1.13

表 4.2-8 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）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		寿命中平均値
		BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	
内側炉心	1	18.5	20.9	19.0	20.6	18.9	20.2	19.7
	2	18.6	19.8	18.9	19.7	18.9	19.4	19.2
外側炉心	3	22.3	21.9	22.6	21.7	22.3	21.1	22.0
	4	21.2	20.8	21.4	20.5	21.1	19.8	20.8
	5	19.1	19.3	19.2	19.1	19.0	18.7	19.1
	6	17.9	16.4	18.1	16.3	18.0	16.0	17.1
	7	16.1	15.1	16.2	15.1	16.2	15.0	15.6
	8	14.9	13.6	15.1	13.8	15.1	13.7	14.3
	9	13.4	12.2	13.5	12.1	13.6	12.2	12.8
	10	11.6	10.7	11.7	10.7	11.8	10.8	11.2

※単位: kW

表 4.2-9 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）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		寿命中平均値	寿命末期値
		BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC		
内側炉心	1	624.3	654.0	630.4	650.7	629.7	645.8	639.2	645.8
	2	638.2	654.0	642.1	652.5	641.4	648.6	646.1	648.6
外側炉心	3	651.3	646.2	654.0	644.0	650.7	636.5	647.1	636.5
	4	652.7	646.7	655.0	643.6	650.6	635.5	647.4	635.5
	5	651.7	655.0	653.8	651.5	650.8	646.2	651.5	646.2
	6	652.9	630.1	655.0	628.8	653.5	624.8	640.8	624.8
	7	653.7	636.7	655.0	637.6	654.9	635.7	645.6	635.7
	8	650.9	627.8	654.3	631.3	655.0	630.4	641.6	630.4
	9	651.1	628.8	653.6	627.3	655.0	628.2	640.7	628.2
	10	650.1	630.2	651.2	628.6	654.0	632.4	641.1	632.4

※単位: °C

表 4.2-10 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力

炉心	流量領域	被覆管周方向応力*1 [MPa]	CDF*1 [-]	備考
内側炉心	1	105.5	2.6E-02	平均出力(寿命末期 燃焼度)最大
	2	107.5	5.1E-02	平均及び寿命末期被 覆管温度最高
外側炉心	3	119.4	7.2E-02	平均出力(寿命末期 燃焼度)最大
	5	105.9	4.3E-02	平均及び寿命末期被 覆管温度最高

\*1: 寿命末期

表 4.2-11 中型高出口温度型導入期炉心の主要核特性

項目	導入期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	27ヶ月 (821日)	←
燃料交換/パッチ数 (炉心)	3 パッチ	←
炉心高さ	1,000 mm	←
軸ブランケット高さ (上)	100 mm	0 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup>	12.1 wt%	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	16.0 / 10.0 wt%	16.0 / 10.0 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	92.4 / 13.0 GWd/t	93.8 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	84.7 GWd/t	93.8 GWd/t
燃焼反応度	0.19 % Δk/kk'	0.58 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.097	1.032
(炉心/軸方向ブランケット)	1.037 / 0.060	1.032 / -
最大線出力 (内側/外側)	255 / 275 W/cm	256 / 279 W/cm
炉心平均出力密度	164 W/cm <sup>3</sup>	←
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	0.985 / 0.015	1.000 / -
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$2.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$2.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$5.2 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$5.2 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (パッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	15.7 / 1.7 t	15.7 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	約0.1	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	5.4 t/GWe	5.5 t/GWe
原子炉倍増時間	68年	-
複合システム倍増時間 <sup>*4</sup>	85年	-
ボイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	6.9 \$ <sup>*7</sup>	6.7 \$ <sup>*7</sup>
ドップラー係数 [Tdk/dT] <sup>*6</sup> (平衡末期)	$-4.2 \times 10^{-3}$	$-4.2 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	3.72 m	←
遮へい体外接円径	5.24 m	←

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

\*4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、\*5: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*6: 非均質補正 (1.05) 考慮、

\*7: 実効遅発中性子割合0.00358

表 4.2-12 中型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性

項目	高燃焼度化平衡期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	28ヶ月 (852日)	27ヶ月 (821日)
燃料交換バッチ数 (炉心)	6 バッチ	3 バッチ
炉心高さ	1,150 mm	1,000 mm
軸ブランケット高さ (上)	0 mm	←
Pu富化度 <sup>*1</sup>	11.7 wt%	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	16.0 / 10.0 wt%	16.0 / 10.0 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	145.7 / - GWd/t	93.8 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	145.7 GWd/t	93.8 GWd/t
燃焼反応度	0.50 % Δk/kk'	0.58 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.031	1.032
(炉心/軸方向ブランケット)	1.031 / -	1.032 / -
最大線出力 (内側/外側)	190 / 215 W/cm	256 / 279 W/cm
炉心平均出力密度	143 W/cm <sup>3</sup>	164 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -	←
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$2.6 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$2.5 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$7.4 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$5.2 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	10.5 / - t	15.7 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	0	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	6.9 t/GWe	5.5 t/GWe
ボイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期)	$7.8 \$^6$	$6.7 \$^6$
ドップラー係数 [Tdk/dT] <sup>*5</sup> (平衡末期)	$-3.8 \times 10^{-3}$	$-4.2 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	4.01 m	3.72 m
遮へい体外接円径	5.47 m	5.24 m

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

\*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、\*6: 実効遅発中性子割合 0.00358

表 4.2-13 大型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様基本サーベイ結果

項目		中型炉心	倍インベントリ大型炉心
炉心仕様	原子炉熱出力 (MWth)	1,785	3,570
	運転サイクル長さ (ヶ月)	27	←
	炉心高さ (mm)	1,000	←
燃料要素	集合体数 (内側/外側炉心)	159 / 234	261 / 381
	遮へい体外接円径 (m)	5.24	5.24
	被覆管外径 (mm)	8.50	←
	被覆管内径 (mm)	7.50	←
	被覆管肉厚 (mm)	0.50	←
	燃料ピン本数	271	331
集合体	Zr含有率 (内側/外側炉心) (wt%)	16.0 / 10.0	←
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	9.55	9.64
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.12	1.13
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	169.5	187.8
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	159.5	177.8
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	←
	ラッパ管間ギャップ (mm)	5.5	6.8
	集合体配列ピッチ (mm)	175.0	194.6
	ワイヤ径 (mm)	1.00	1.09
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200	200
	体積比 (%)	燃料	45.1
構造材		24.3	23.3
冷却材		30.5	32.1
核特性	Pu富化度 (wt%)	12.4	11.7
	増殖比	1.032	1.066
	炉心部取出平均燃焼度 (GWd/t)	93.8	95
	Naボイド反応度 (平衡末期) (\$)	6.7	7.6
規格化包絡熱出力		1.043	1.053

※最大バンドル部圧力損失を保存

表 4.2-14 大型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様詳細サーベイ結果

合計	燃料集合体数		内側炉心集合体割合 [%]	核特性解析結果		備考
	内側炉心	外側炉心		増殖比	規格化包絡熱出力	
588	261	327	44.4	1.046	1.0376	解析値
	276	312	46.9	1.041	1.0372	
	324	264	55.1	1.028	1.0489	
558	225	333	40.3	1.038	1.0337	解析値
	243	315	43.5	1.033	1.0338	
	261	297	46.8	1.026	1.0383	
528	185	343	35.0	1.03	1.0335	558体炉心及び588体炉心サーベイ結果からの外挿による推測値
	201	327	38.1	—	1.0310	
	216	312	40.9	—	1.0335	

表 4.2-15 大型高出口温度型炉心の主要燃料仕様

項目	仕様				
	炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット		
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr	なし	
	被覆管材料	ODS鋼			
	被覆管外径 (mm)	8.5			
	被覆管内径 (mm)	7.5			
	被覆管肉厚 (mm)	0.5			
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,720			
	ボンド材	ナトリウム			
	燃料スミア密度 (%TD)	75	←		
	Zr含有率 (wt%)	10以上	10		
集合体	燃料ピン本数 (本)	331		なし	
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	9.77			
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.15			
	ラッパ管材料	PNC-FMS鋼			
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	190.3			
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	180.3			
	ラッパ管肉厚 (mm)	5			
	ラッパ管間ギャップ (mm)	7.1			
	集合体配列ピッチ (mm)	197.4			
	ワイヤ径 (mm)	1.22			
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200			
	体積比 (%)	燃料 (実効)	43.3 (32.5)		←
		構造材	23.0		←
冷却材		33.7	←		

表 4.2-16 大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の主要炉心核特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	23.1ヶ月 (703日)
燃料交換バッチ数 (炉心)	3 バッチ
炉心高さ	1,000 mm
軸ブランケット高さ (上)	0 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup>	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	16.0 / 10.0 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	94.1 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	94.1 GWd/t
燃焼反応度	0.42 %Δk/k'
増殖比 (全体)	1.034
(炉心/軸方向ブランケット)	1.034 / -
最大線出力 (内側/外側)	288 / 315 W/cm
炉心平均出力密度	182 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$2.8 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$5.0 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	26.8 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.7 t/GWe
ポイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期)	7.6 \$ <sup>*6</sup>
ドップラー係数 [Δk/dT] <sup>*5</sup> (平衡末期)	$-4.2 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	5.00 m
遮へい体外接円径	6.73 m

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

\*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、

\*6: 実効遅発中性子割合 0.00355



表 4.2-17(1) 大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支  
 -1 バッチ当たり平衡装荷及び取出燃料-

核種	平衡装荷			平衡取出		
	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	28.9	41.0	69.9	8.7	17.9	26.7
U-236	0.0	0.0	0.0	3.7	4.3	8.0
U-238	9,612.0	13,616.3	23,228.3	8,258.1	12,249.9	20,508.0
U合計	9,641.0	13,657.2	23,298.2	8,270.5	12,272.1	20,542.7
Np-237	5.6	8.0	13.6	6.6	9.6	16.2
Np-239	0.0	0.0	0.0	1.7	1.7	3.5
Np合計	5.6	8.0	13.6	8.3	11.3	19.7
Pu-238	15.5	22.0	37.5	16.1	23.0	39.1
Pu-239	929.9	1,317.4	2,247.3	954.4	1,342.1	2,296.5
Pu-240	355.1	503.0	858.1	393.4	532.6	926.0
Pu-241	33.8	47.9	81.7	51.3	63.0	114.3
Pu-242	33.8	47.9	81.7	32.2	45.1	77.3
Pu合計	1,368.1	1,938.1	3,306.2	1,447.4	2,005.8	3,453.2
Am-241	22.5	31.9	54.5	16.9	28.4	45.3
Am-242m	0.0	0.0	0.0	1.3	1.8	3.1
Am-243	7.0	10.0	17.0	8.2	11.1	19.2
Am合計	29.6	41.9	71.5	26.4	41.2	67.6
Cm-242	0.0	0.0	0.0	1.2	1.3	2.5
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3
Cm-244	5.6	8.0	13.6	7.6	9.8	17.4
Cm-245	1.4	2.0	3.4	1.4	1.9	3.4
Cm合計	7.0	10.0	17.0	10.3	13.2	23.5
合計	11,051.4	15,655.2	26,706.6	9,763.0	14,343.6	24,106.6
FP <sup>*1</sup>	38.3	46.1	84.4	38.3	46.1	84.4
FP <sup>*2</sup>	0.0	0.0	0.0	1,291.3	1,316.3	2,607.7
FP合計	38.3	46.1	84.4	1,329.7	1,362.4	2,692.0

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 4.2-17(2) 大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の物量収支  
 —平衡初期及び末期燃料—

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	61.1	95.3	156.5	40.9	72.3	113.2
U-236	5.0	5.5	10.5	8.7	9.8	18.5
U-238	27,435.1	39,447.6	66,882.7	26,081.2	38,081.2	64,162.4
U合計	27,501.3	39,548.4	67,049.7	26,130.8	38,163.3	64,294.1
Np-237	18.1	25.8	44.0	19.1	27.4	46.5
Np-239	3.8	3.7	7.5	5.5	5.5	11.0
Np合計	21.9	29.6	51.5	24.6	32.9	57.5
Pu-238	46.6	66.1	112.7	47.2	67.2	114.4
Pu-239	2,857.8	4,008.2	6,866.0	2,882.3	4,032.9	6,915.2
Pu-240	1,106.6	1,540.1	2,646.7	1,144.9	1,569.7	2,714.7
Pu-241	123.5	162.3	285.8	141.0	177.4	318.4
Pu-242	98.8	140.2	239.0	97.2	137.4	234.5
Pu合計	4,233.4	5,916.9	10,150.3	4,312.6	5,984.6	10,297.2
Am-241	59.8	90.7	150.4	54.1	87.1	141.3
Am-242m	2.0	2.4	4.4	3.3	4.1	7.4
Am-243	22.5	31.2	53.7	23.6	32.3	55.9
Am合計	84.2	124.2	208.5	81.1	123.5	204.6
Cm-242	2.5	2.7	5.3	3.7	4.0	7.7
Cm-243	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.6
Cm-244	19.0	25.8	44.8	20.9	27.6	48.6
Cm-245	4.1	5.8	9.9	4.2	5.7	9.9
Cm合計	25.8	34.5	60.3	29.1	37.6	66.8
合計	31,866.6	45,653.5	77,520.2	30,578.3	44,341.9	74,920.2
FP <sup>*1</sup>	114.9	138.2	253.1	114.9	138.2	253.1
FP <sup>*2</sup>	1,291.9	1,317.9	2,609.7	2,583.2	2,634.2	5,217.4
FP合計	1,406.8	1,456.1	2,862.9	2,698.1	2,772.4	5,470.5

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 運転中生成FP

表 4.2-18 大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）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	1.8	0.4	0.5
a)出力補償	0.5	0.4	0.5
b)燃焼補償	0.7		
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 $\sigma$ )	0.5	0.1	0.1
a)臨界性予測誤差	0.0		
b)出力補償予測誤差		0.1	0.1
c)燃料製作公差	0.5		
d)燃料交換余裕	0.2		
3.事故時投入反応度		0.1	0.1
4.最小反応度停止余裕	0.4		
必要制御反応度	2.7	0.6	0.7
補正後制御棒価値	4.0	1.0	1.2
反応度停止余裕	1.3	0.4	0.4

単位:% $\Delta k/kk'$

表 4.2-19 大型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の流量配分結果

炉心領域	流量領域	集合体数	集合体 最大出力	集合体流量	必要 領域流量	被覆管内面 最高温度 <sup>*2</sup>	バンドル部 圧力損失
			[MW]	[kg/s]	[kg/s]	[°C]	[MPa]
内側炉心	1	39	8.27	37.1	1446.9	654	0.19
	2	153	7.64	35.0	5355.0	655	0.17
	3	60	6.93	30.8	1848.0	655	0.14
外側炉心	4	39	8.18	37.5	1462.5	654	0.20
	5	69	7.52	34.1	2352.9	654	0.17
	6	45	6.78	31.1	1399.5	653	0.14
	7	42	5.98	28.3	1188.6	655	0.12
	8	36	5.18	25.7	925.2	655	0.10
	9	48	4.27	21.7	1041.6	655	0.07
	10	24	3.37	18.7	448.8	655	0.06
合計(最大値)	—	555	3773.73	(37.5)	17469.0	(655)	(0.20)
					炉心流量 <sup>*1</sup> [kg/s]	17472.0	
					余剰流量 [kg/s]	+3.0 (+0.0%)	

\*1: 1次系流量の内、96%を燃料集合体冷却用に配分

\*2: HSF計算結果:1.23~1.24、周辺流れ効果係数計算結果:1.12

表 4.2-20 大型高出口温度型導入期炉心の主要核特性

項目	導入期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	23.1ヶ月 (703日)	←
燃料交換バッチ数 (炉心)	3 バッチ	←
炉心高さ	1,000 mm	←
軸フランケット高さ (上)	100 mm	0 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup>	12.2 wt%	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	16.0 / 10.0 wt%	16.0 / 10.0 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向フランケット)	92.5 / 13.2 GWd/t	94.1 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	84.7 GWd/t	94.1 GWd/t
燃焼反応度	0.22 % Δk/kk'	0.42 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.101	1.034
(炉心/軸方向フランケット)	1.040 / 0.060	1.034 / -
最大線出力 (内側/外側)	291 / 309 W/cm	288 / 315 W/cm
炉心平均出力密度	182 W/cm <sup>3</sup>	←
出力分担率 (炉心/軸方向フランケット)	0.984 / 0.016	1.000 / -
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$2.8 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$2.8 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$5.1 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$5.0 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ(バッチ当たり) (炉心/軸方向フランケット)	26.8 / 2.9 t	26.8 / - t
フランケット/炉心重金属重量比	約0.1	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.6 t/GWe	4.7 t/GWe
原子炉倍增時間	56年	-
複合システム倍增時間 <sup>*4</sup>	76年	-
ポイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.9 \$ <sup>*7</sup>	7.6 \$ <sup>*7</sup>
ドブラー係数 [Dk/dT] <sup>*6</sup> (平衡末期)	$-4.5 \times 10^{-3}$	$-4.2 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	5.00 m	←
遮へい体外接円径	6.73 m	←

\*1: Pu/HM、\*2: フランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

\*4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、\*5: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*6: 非均質補正 (1.05) 考慮、

\*7: 実効遅発中性子割合0.00355

表 4.2-21 大型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の主要核特性

項目	高燃焼度化平衡期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	22ヶ月 (669日)	23.1ヶ月 (703日)
燃料交換バッチ数 (炉心)	5 バッチ	3 バッチ
炉心高さ	950 mm	1,000 mm
軸ブランケット高さ (上)	170 mm	0 mm
Pu富化度 <sup>*1</sup>	13.4 wt%	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	16.0 / 10.0 wt%	16.0 / 10.0 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	152.1 / 24.2 GWd/t	94.1 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 <sup>*2</sup>	131.4 GWd/t	94.1 GWd/t
燃焼反応度	1.45 % Δk/k'	0.42 % Δk/k'
増殖比 (全体)	1.038	1.034
(炉心/軸方向ブランケット)	0.942 / 0.096	1.034 / -
最大線出力 (内側/外側)	279 / 321 W/cm	288 / 315 W/cm
炉心平均出力密度	191 W/cm <sup>3</sup>	182 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	0.970 / 0.030	1.000 / -
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	$2.6 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$2.8 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	$7.4 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>	$5.0 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	15.3 / 2.9 t	26.8 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	約0.2	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.8 t/GWe	4.7 t/GWe
ポイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期)	7.8 \$ <sup>*6</sup>	7.6 \$ <sup>*6</sup>
ドップラー係数 [dk/dT] <sup>*5</sup> (平衡末期)	$-3.8 \times 10^{-3}$	$-4.2 \times 10^{-3}$
炉心等価直径	5.00 m	←
遮へい体外接円径	6.73 m	←

\*1: Pu/HM、\*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、\*3: E &gt; 0.1 MeV、

\*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、\*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、\*6: 実効遅発中性子割合 0.00355

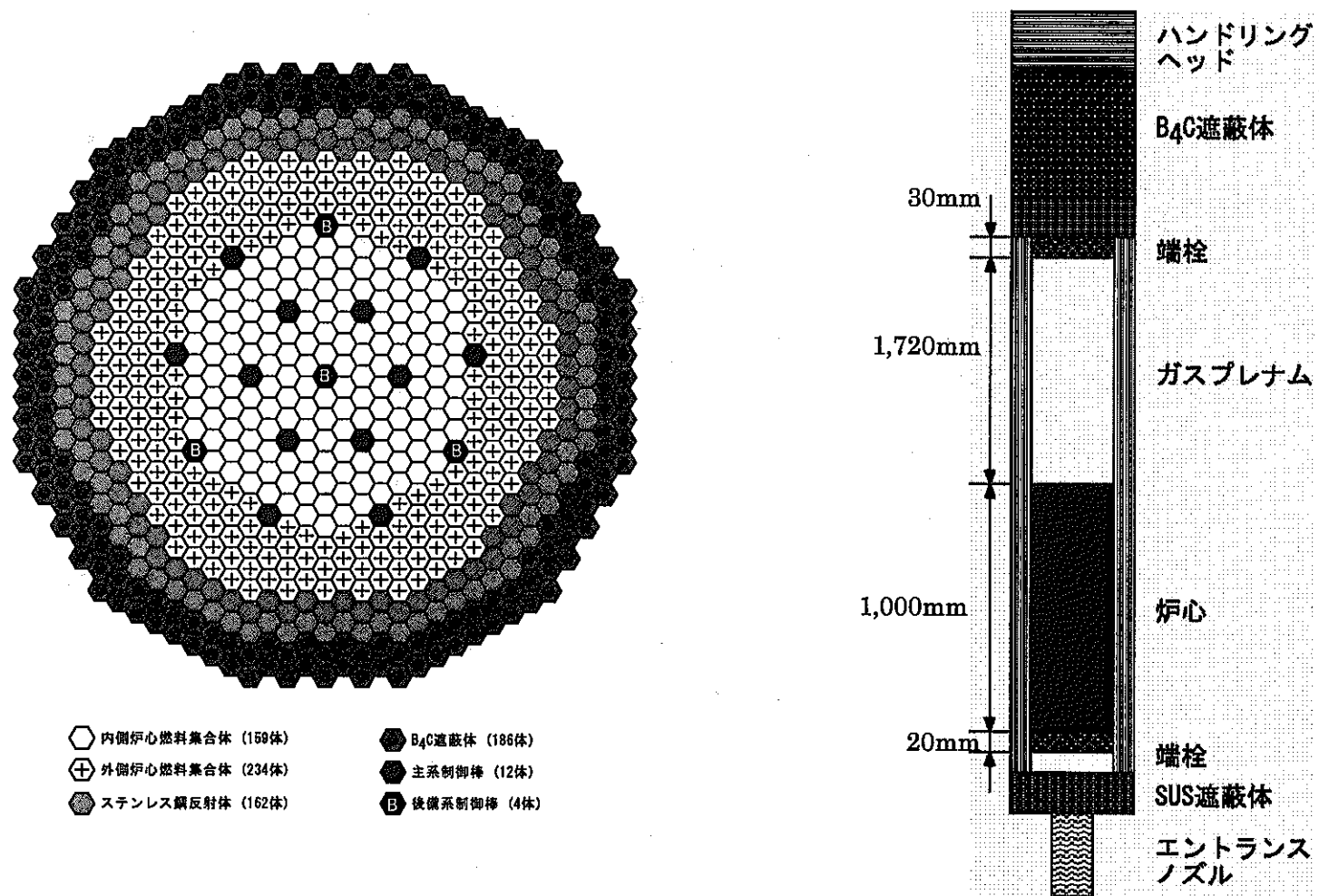


図 4.2-1 中型高出口温度型基準炉心（平衡期炉心）の炉心配置図

3分の1炉心 (回転対称)

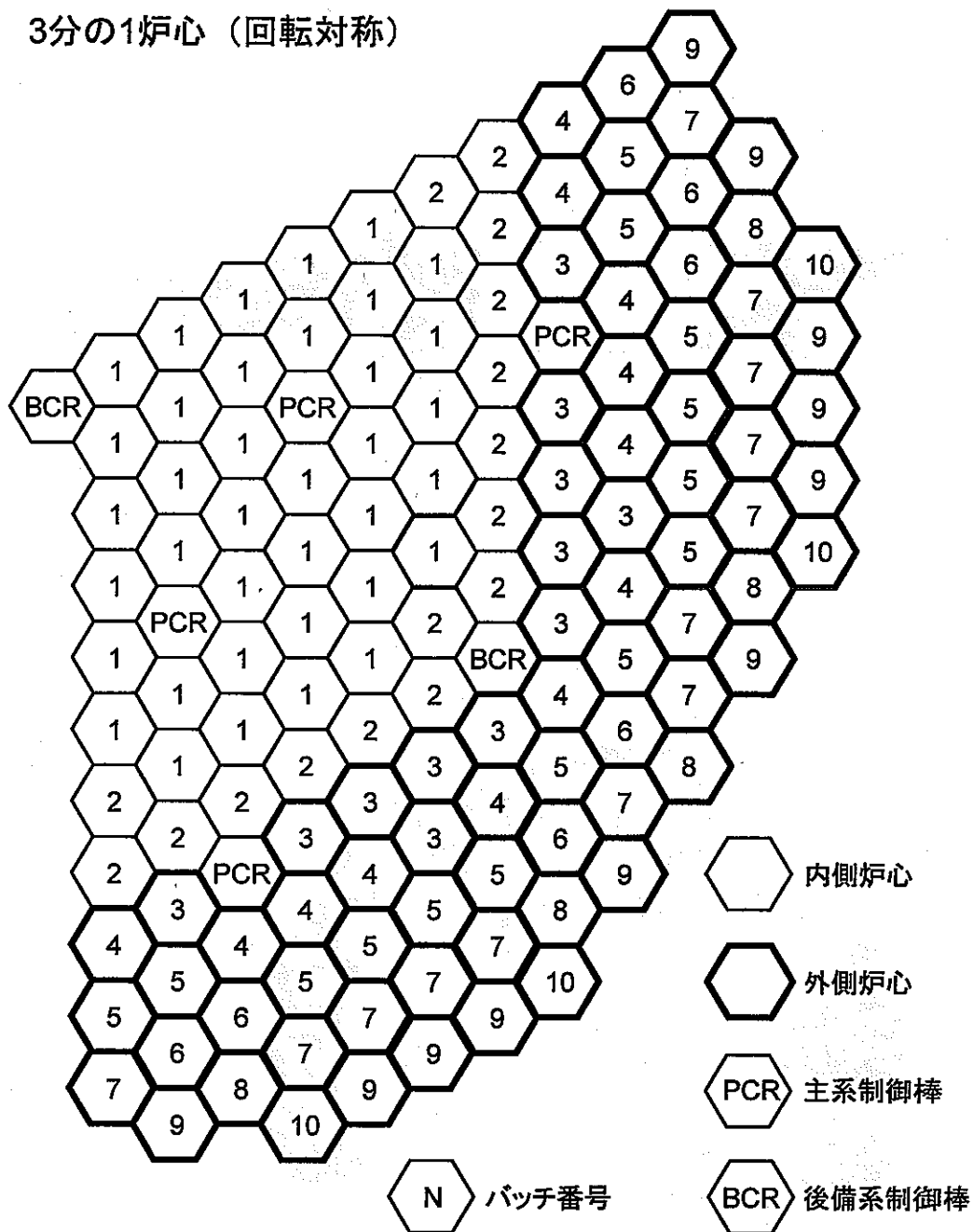
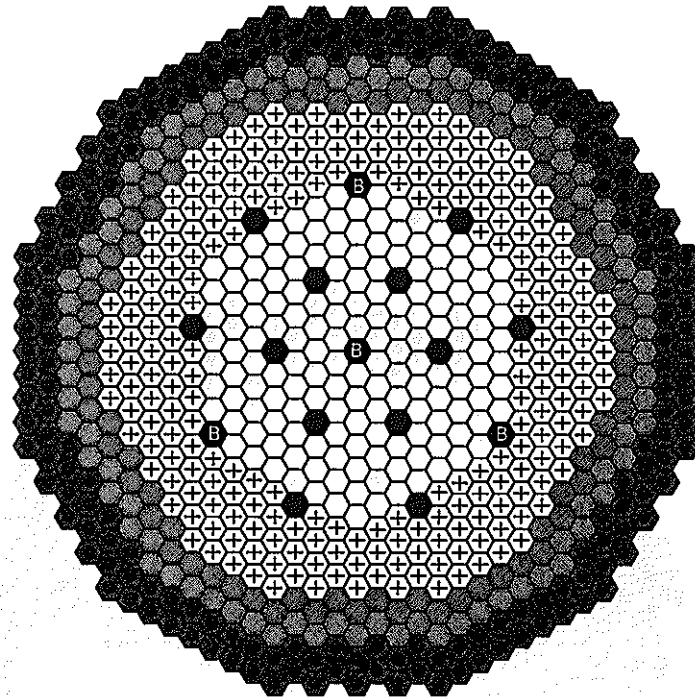


図 4.2-2 中型高出口温度基準炉心 (平衡期炉心) の流量配分領域図





- |                  |                            |
|------------------|----------------------------|
| 内側炉心燃料集合体 (159体) | B <sub>4</sub> C遮蔽体 (186体) |
| 外側炉心燃料集合体 (234体) | 主系制御棒 (12体)                |
| ステンレス鋼反射体 (162体) | 後援系制御棒 (4体)                |

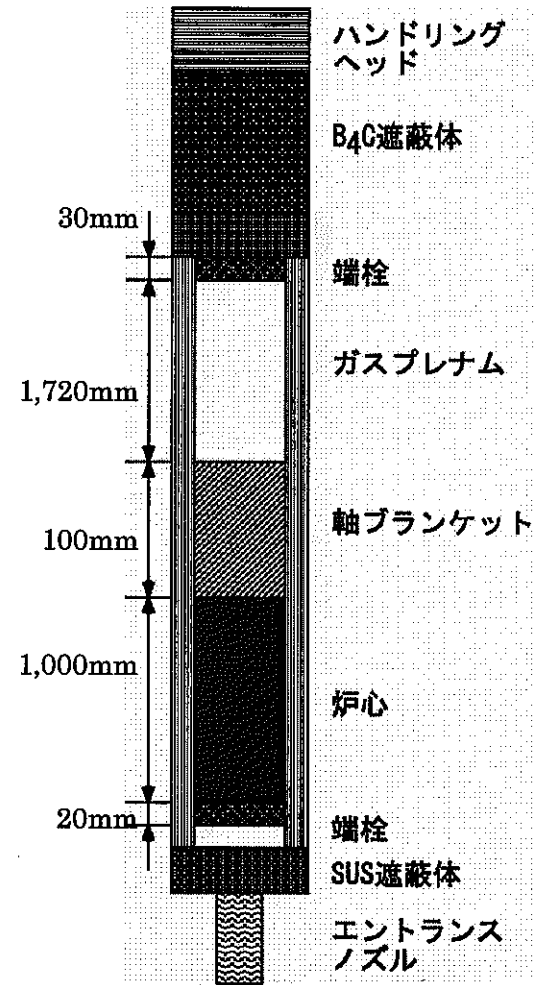


図 4.2-3 中型高出口温度型導入期炉心の炉心配置図

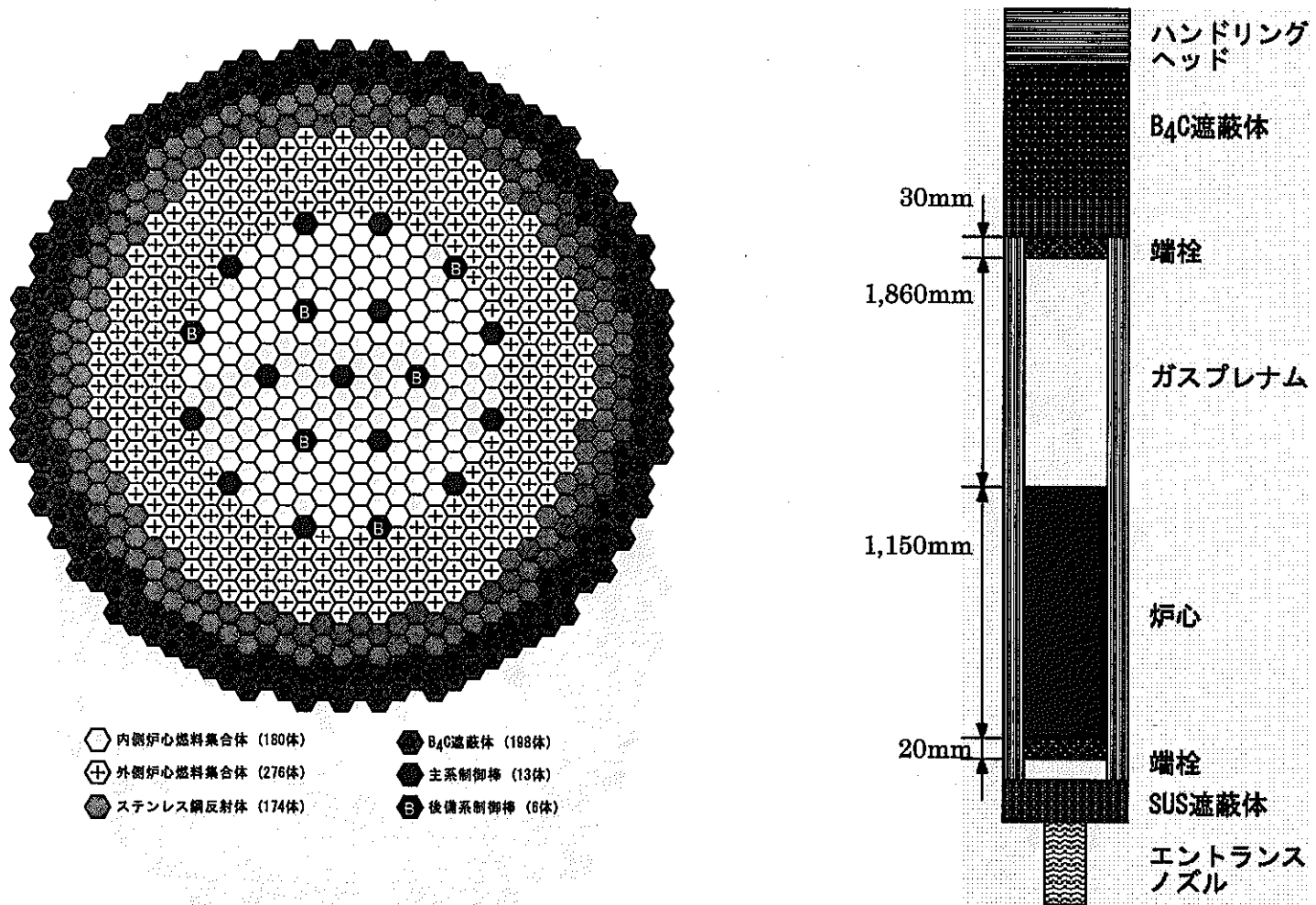


図 4.2-4 中型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の炉心配置図

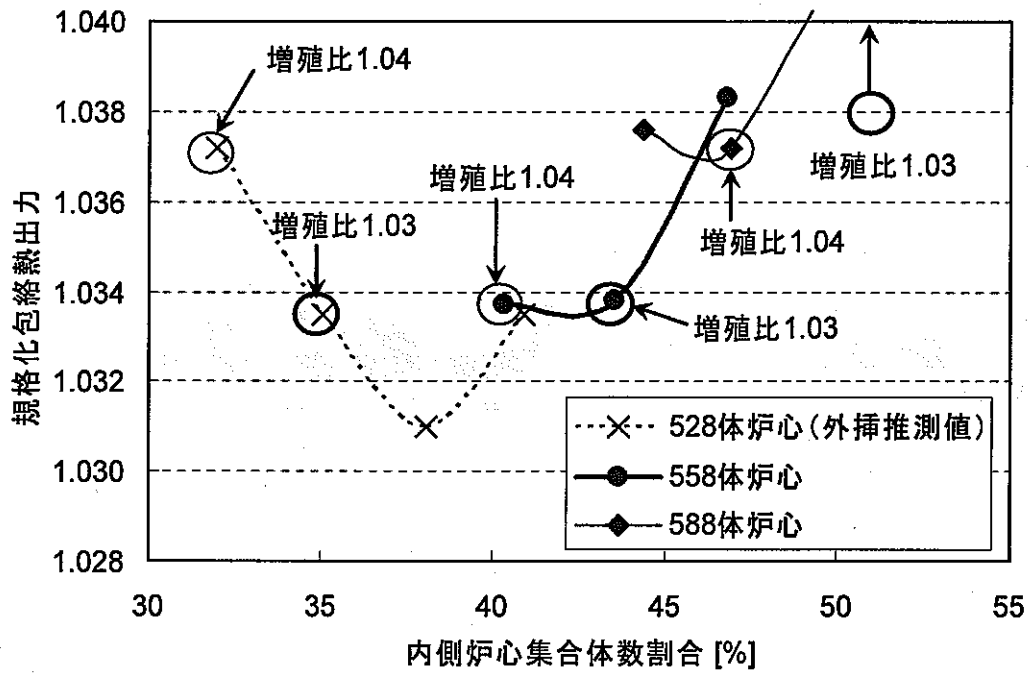


図 4.2-5 大型高出口温度型炉心の炉心・燃料仕様サーベイ結果

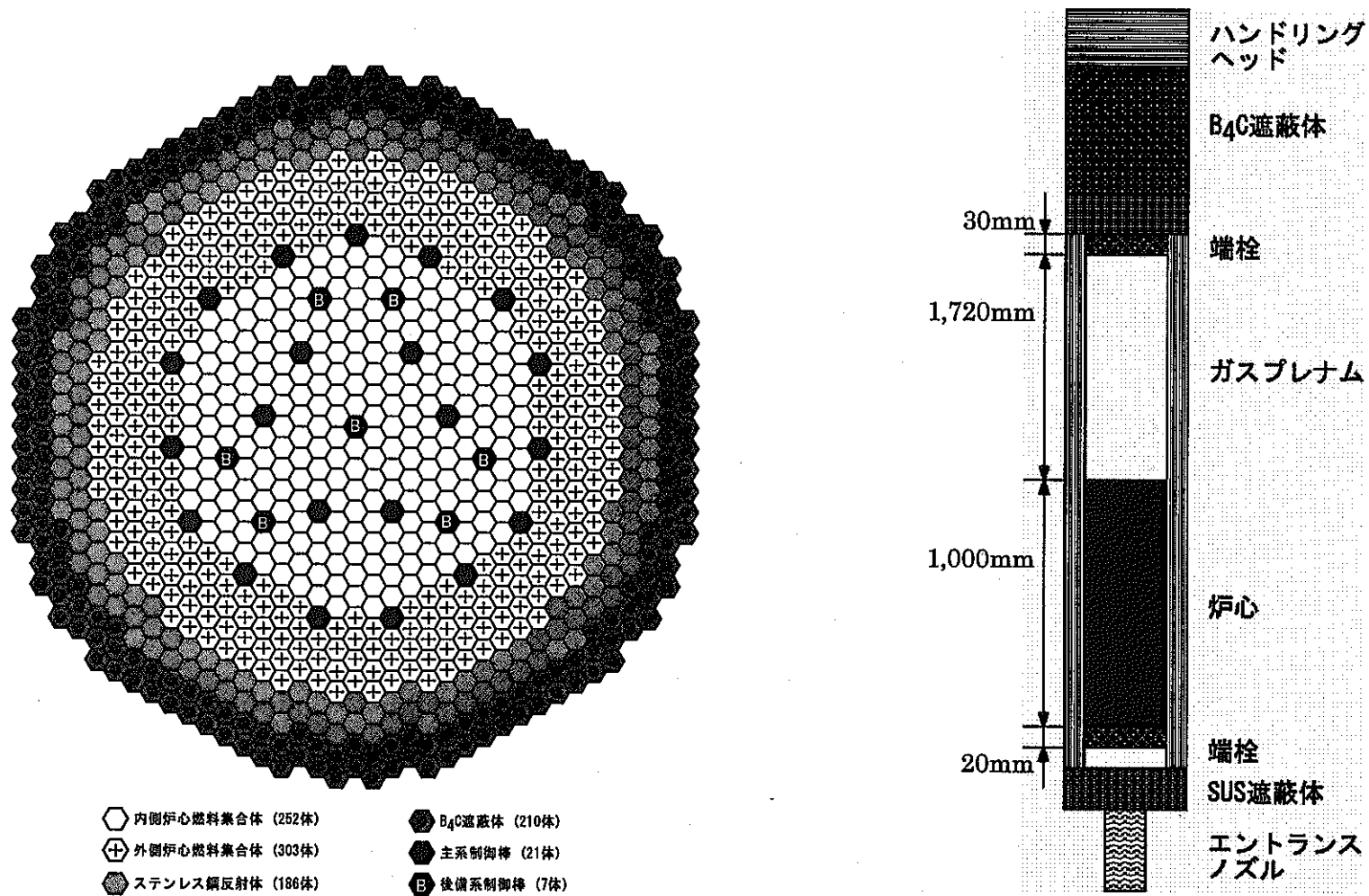


図 4.2-6 大型高出口温度型基準炉心 (平衡期炉心) の炉心配置図

3分の1炉心 (回転対称)

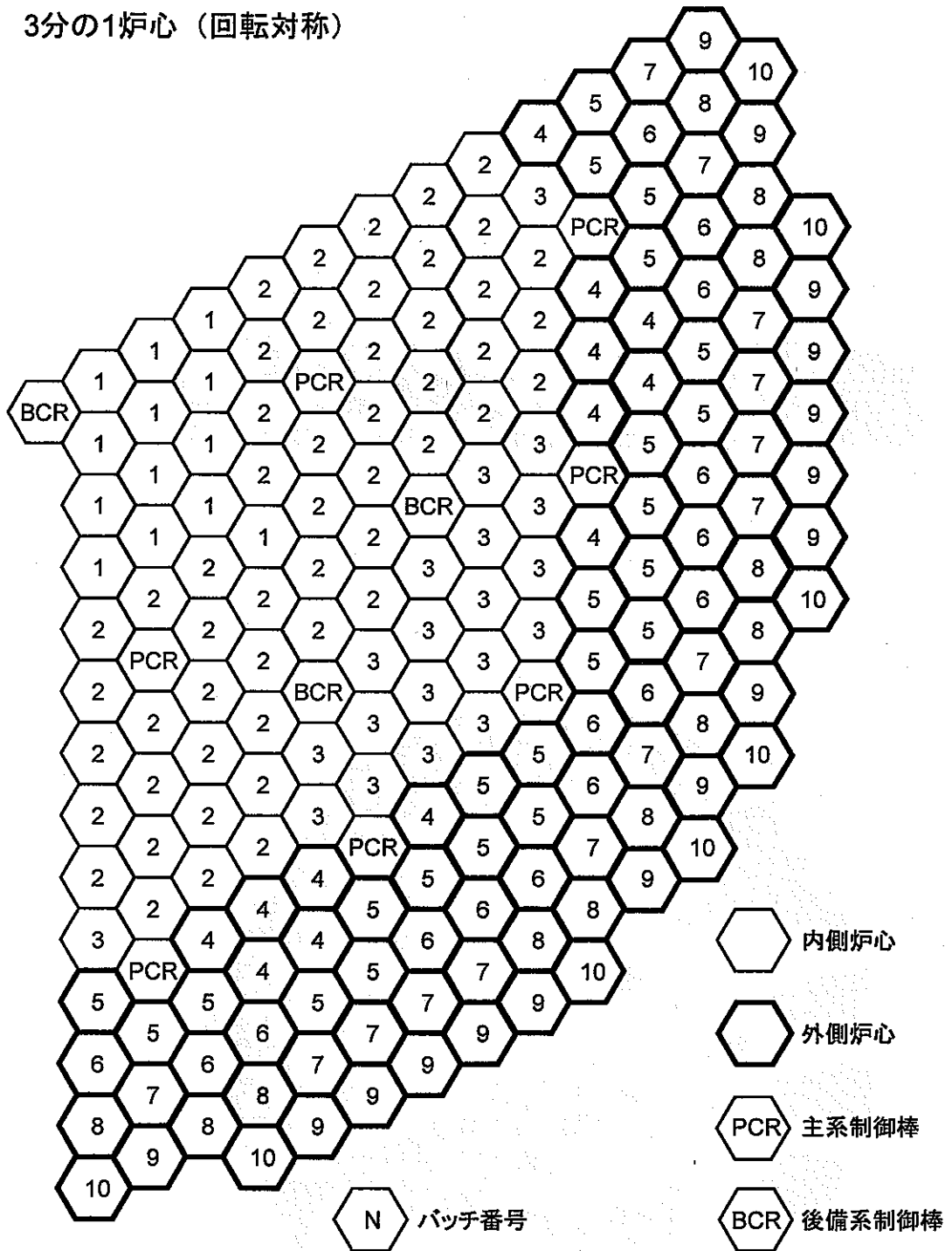


図 4.2-7 大型高出口温度基準炉心 (平衡期炉心) の流量配分領域図

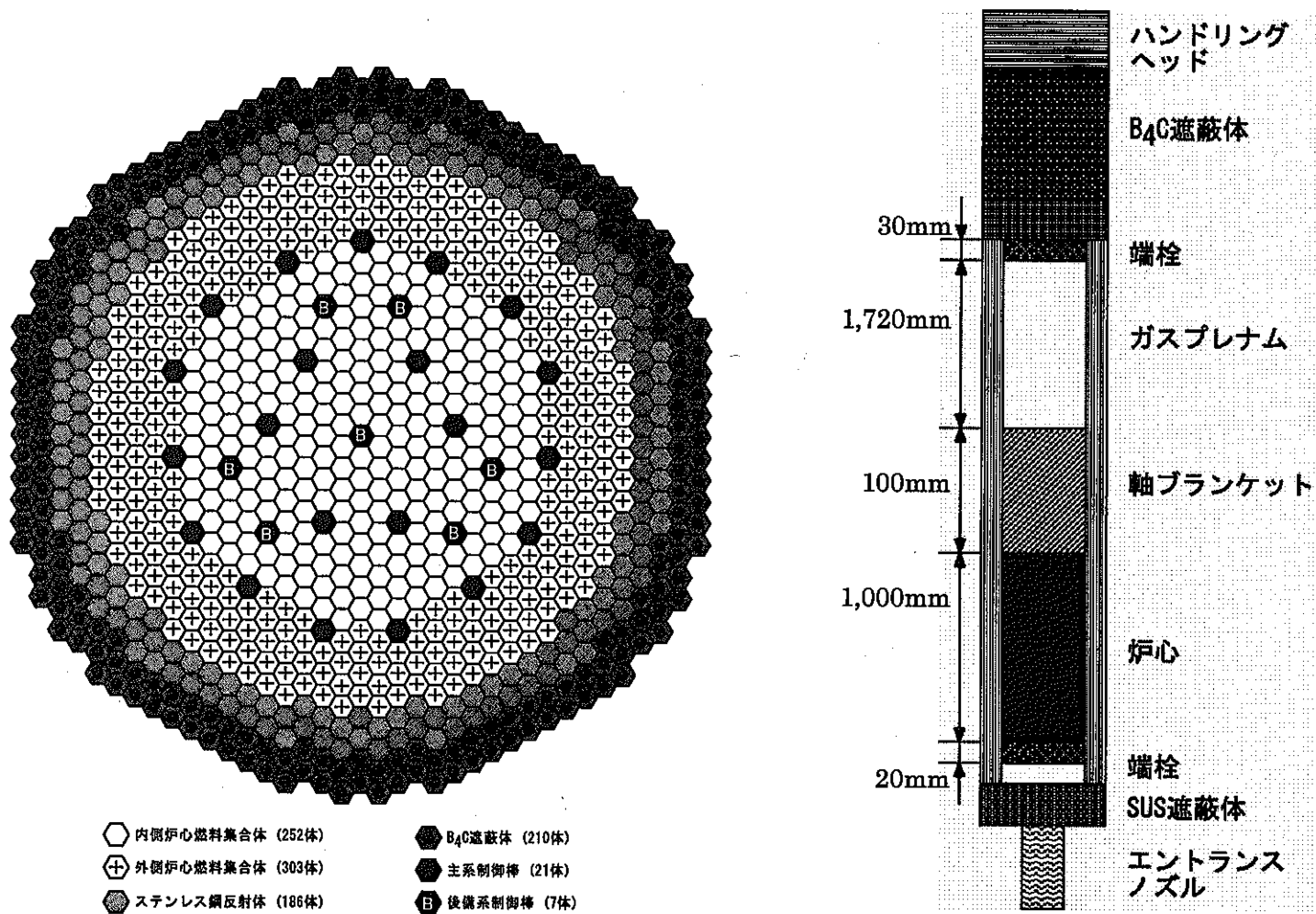


図 4.2-8 大型高出口温度型導入期炉心の炉心配置図

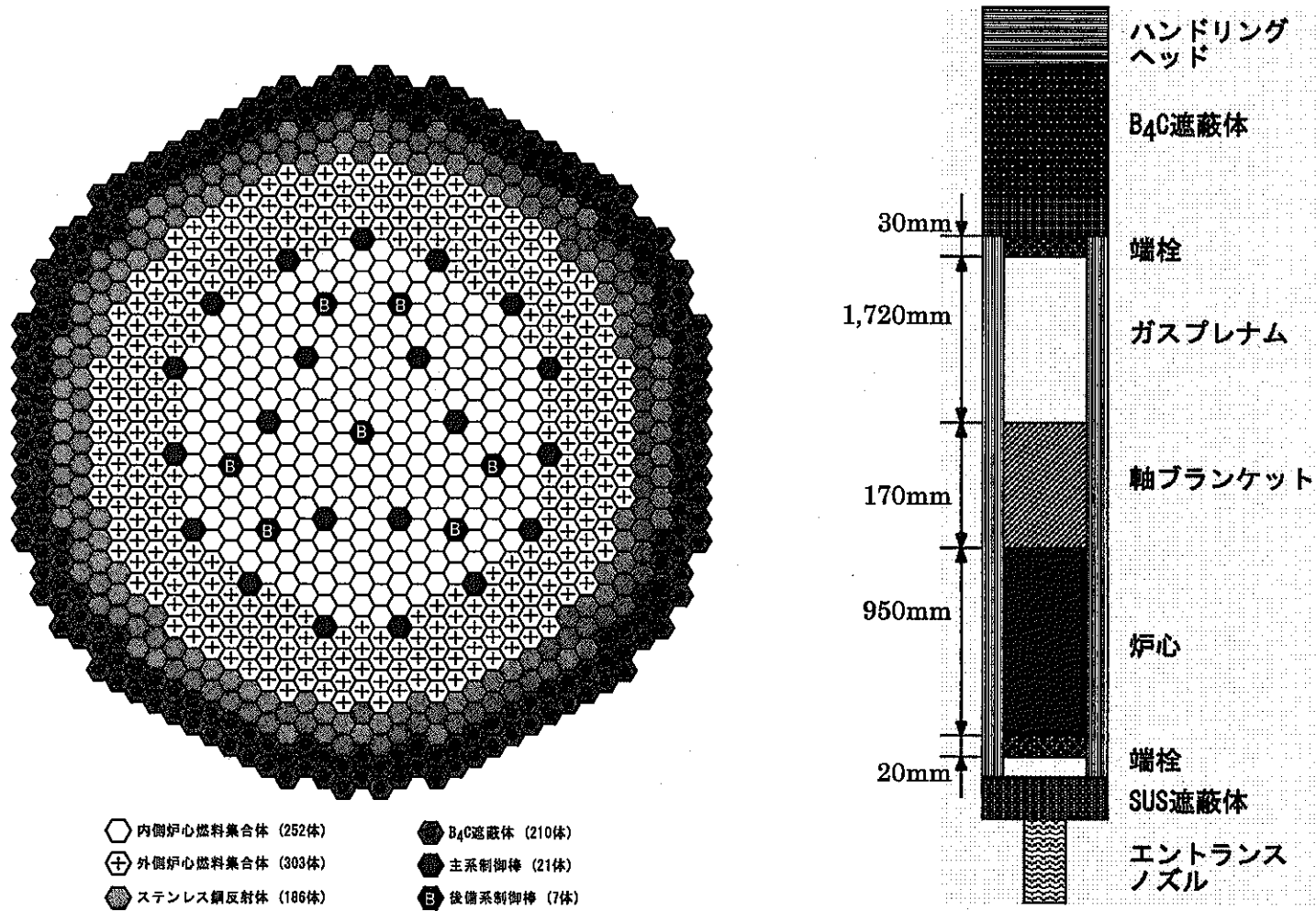


図 4.2-9 大型高出口温度型高燃焼度化平衡期炉心の炉心配置図

## 5. 技術的成立性の評価と今後の課題

### 5.1 技術的成立性の評価

#### (1) 設計制限因子

金属燃料を採用した場合の設計制限因子として、定常時の温度制限については燃料スラグと被覆管の液相形成による被覆管温度制限、定常時の燃料ピン健全性については短時間強度の制限、最大線出力に関する制限が考えられる。

燃料スラグと被覆管の液相形成については、付録 A に概略を紹介しているが、燃料スラグと被覆管の相互作用により両者の界面近傍に低融点の相が形成され、高温条件時に燃料スラグ周辺部で大きなポアを含む液相含有領域が形成されるとともに、被覆管内面の侵食が助長される挙動である。現状の検討では、被覆管内面温度を 650℃以下に制限すれば液相形成は回避されると考えられ、フェーズ II の検討では 650℃を定格時の温度制限条件と設定している。

短時間強度については、通常 MOX 燃料では定常時の健全性の判断因子は CDF が制限となるが、金属燃料炉心では MOX 燃料炉心と比べ上記の被覆管温度制限からより低温条件となることから、ODS 鋼を採用した場合 CDF は小さく抑えられ、むしろ照射末期の周方向応力（フープ応力）が制限になることがフェーズ II の検討の結果明らかとなった。仮に CDF が制限条件の 0.5 となる仕様を設定すると、その場合、照射末期の被覆管フープ応力は 200 MPa を超える値となり、過渡・事故時には短時間強度の観点から健全性に懸念が生じるものと考えられる。そこで、フェーズ II の設計検討においては、照射末期フープ応力の制限目安値として、暫定的に MOX 燃料炉心の事故時制限温度 900℃に相当する照射末期フープ応力（事故初期フープ応力）を設定することとした。図 5.1-1 に ODS 鋼のクリープ強度式から評価した事故時到達温度と CDF が SR ベースで 1 となる事故初期フープ応力の関係を示すが、ここで、工学的余裕・保守性を見込まない場合、フープ応力は 175 MPa、900℃に工学的余裕 50℃と保守性として温度上昇率 5℃/s を見込んだ場合、120 MPa と見積もられることがわかった。フェーズ II の検討では、高速中性子照射量制限目安を満足する炉心については工学的余裕・保守性を考慮し照射末期フープ応力 120 MPa を、高燃焼度化炉心については 175 MPa を、制限目安値として暫定的に設定することとした。

定常時の最大線出力については、従来設計検討例・照射実績<sup>②</sup>を参考に 500 W/cm を暫定しているが、現状、金属燃料の温度評価モデルについて検討を行っている段階であり、今後の検討に応じて見直すことが予想される。

#### (2) 照射試験データ取得

金属燃料の照射実績について、米国 IFR プログラムで実施された照射試験の燃料仕様・照射条件<sup>②</sup>を表 5.1-1 にまとめるとともに、このデータを燃焼度・線出力について整理したマップを図 5.1-2 に示した。このマップ上に、実用化戦略調査研究で検討している金属燃料炉心として、大型コンパクト型と大型高出口温度型の高速中性子照射量制限満足炉心と高燃焼度化炉心の設計値（目安値）も併せてプロットした。

照射実績としては、燃焼度について 200 GWd/t 程度まで、線出力について 500 W/cm 程度にまで及んでおり、実用化戦略調査研究の何れの金属燃料炉心とも、燃焼度・線出力条件については、概ね従来の照射実績の範囲に包絡されているといえる。一方、被覆管温度条件については、実用化戦略調査研究の検討炉心では最高温度として 650℃（被覆管内面温度）と高温条件を想定しており、照射実績のうち同程度の高温条件のデータは U-Zr 2 元系燃料で 660℃の試験があるのみであることから、ODS 鋼を採用した U-Pu-Zr 三元系燃料について高温条件での照射試験を実施し FCCI 挙動等を把握することが必要と考えられる。

Zr 含有率を 2 領域とした高出口温度型炉心については、炉心中央部で Zr 含有率を 16 wt%程度まで高めた燃料を採用している。Zr 含有率の範囲に対する照射実績については、表 5.1-1 に示したように 6



～14 wt%までの試験実績があり、その範囲で照射挙動への影響は小さいという結果が得られている。Zr 含有率の上限については、照射挙動以外に、燃料融点の上昇による燃料製造への影響（溶解用のろつぼやモールドの表面コーティング材と反応層形成の可能性）から現状の設計値より制限されることが予想され、上記の照射実績の範囲で概ね包絡されるものと推測される。

また、金属燃料について、現状では燃料温度評価モデルについて十分検討されている状況でなく、信頼性の高い評価モデルの構築に資するため燃料溶融試験が必要と考えられる。

### (3) 炉心材料

実用化戦略調査研究のナトリウム冷却炉検討では、当初より被覆材として ODS 鋼<sup>⑨</sup>を選定して検討を行ってきた。

ODS 鋼の開発状況としては、9Cr-マルテンサイト系と 12Cr-フェライト系の 2 種類の鋼種を対象に、製造技術の開発を行うとともに、材料強度基準の整備のため炉外にて高温強度、ナトリウム環境効果等の試験が実施されている。一方、照射実績については、現状非常に乏しく、初期の試作材を対象に米国 EBR-II 炉で  $5.5 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> (～35 dpa) まで照射された実績を有するのみである<sup>⑩</sup>。そのため、2003 年からロシアの BOR-60 炉において上記の 2 種類の鋼種の燃料ピンについて照射試験が開始されており、現在の計画では、2005 年までにピーク照射量 25 dpa、ピーク燃焼度 50 GWd/t までの照射を行う予定である。

ODS 鋼は性能（耐スウェリング性・高温強度等）については期待されるものの、上記の通り開発中の材料であり、開発リスク回避のために代替被覆材を選定しておく必要がある。また、金属燃料では、固有の課題として、液相形成挙動に基づく被覆管制限温度の緩和のため、内面にライナを付設した被覆管の検討も実施されている。以下に、「代替被覆材」と「ライナ付被覆管」について検討の概略を示した。

#### [代替被覆材]

金属燃料では、燃料スラグと被覆材の液相形成挙動が健全性上重要な問題であり、オーステナイト系材料のように Ni を多く含む被覆材では液相形成の開始温度が 650℃よりも更に低下する特性が知られている。そのため、代替材としては Ni を多く含む材料の採用は困難であり、現状考え得る主要な候補材のうち、高 Ni 系材料・改良オーステナイト鋼については除外することとし、高温強度は低下するがフェライト/マルテンサイト鋼を選定することとした（ここで、参考として高 Ni 系材料、改良オーステナイト鋼、フェライト/マルテンサイト鋼の特性・開発見通しについて表 5.1-2 にまとめた）。

ただし、フェライト/マルテンサイト鋼を採用した場合には、高温強度の低下に伴い、炉心出口温度を低減させる等の方策も必要となることが考えられ、炉心・燃料設計への影響については、今後、詳細な検討を行い把握することが必要である。

#### [ライナ付被覆管]

金属燃料においては、燃料スラグと被覆材の液相形成挙動により炉心出口温度が制限される。その改善の方策の 1 つとして、被覆材の内側にバリア機能を有するライナを付設して、U-Pu 金属と Fe の接触を防ぐ方法が考えられる。

このライナの材料としては、U-Pu-Zr 合金との共存性に優れる Zr・V 等が有望と考えられ、電中研において長時間までの高温拡散試験の結果が報告されている<sup>⑩</sup>。具体的には、厚さ 30 μm 程度の窒化 Zr 箔・V 箔を添付した HT-9 鋼と U-Zr 合金との高温拡散試験を実施しており、750℃の温度条件でも 2,250 時間まで U と Fe に反応が生じないという結果が示されている。この様に、ライナの効果については成立の可能性は有するものと考えられる。

一方、ライナの実用化に向けては、被覆管の内側にライナを付設する技術、健全性を確保できるライナ仕様の評価および核特性への影響等、多くの検討課題を有しており、経済性の点においても、被覆管製造に関し負荷が大きい点に留意する必要がある。また、金属燃料炉心ではボイド反応度の制限条件として 8 \$ と MOX 燃料炉心に比較し大きい値を設定しているが、ここでは CDA 起因過程に液相

形成により被覆管が早期に破損し燃料が分散する効果を期待している。そのため、被覆管にライナを付設し液相形成開始温度が上昇すると、CDA 起因過程に被覆管の破損が遅れ、むしろ即発臨界を回避するためにボイド反応度制限を下げる必要が生じる可能性がある。今後、詳細な安全評価を実施し、CDA 挙動の観点からもライナの効果を把握する必要があるものと考えられる。

#### (4) 燃料集合体開発

##### [MABLE 型集合体]

図 5.1-3 に実用化戦略調査研究の金属燃料炉心で採用している MABLE 型集合体の構造概念図を示した。この図からわかるように、金属燃料では熔融燃料の排出性を強化するため、下部軸ブランケットを 5 cm 程度としている。ただ、基本的な構造は従来の燃料集合体と同様であることから、再臨界回避方策を適用した MOX 燃料集合体 (内部ダクト付集合体 (FAIDUS 集合体)、軸ブランケット一部削除型集合体 (ABLE 型集合体)) と異なり、構造、熱流力、製造・再処理性等に関し課題となる点はないものと考えられる。

##### [グリッドスペーサ集合体]

表 5.1-3 にグリッドスペーサとワイヤスペーサについて主要な特徴を比較してまとめた。ワイヤスペーサは、製造が比較的容易で製造コストを安くでき、運転時の機械振動の影響が小さいといった特徴があり、グリッドスペーサより多くの製造・照射実績を有している。一方、グリッドスペーサについては、構造材体積比を低減できる、工学的安全係数・周辺流れ効果を低減できる、バンドル圧力損失について低減の可能性を有する (ただし、要求されるグリッド段数、グリッドの構造に依存する) 等の長所を有しており、実績としては、英国 PFR においてピーク燃焼度 230 GWd/t 程度までの照射実績を有している<sup>(11)</sup> (照射量に関しては、約  $3 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup> 程度)。グリッドスペーサについては、安全性に関し CDA 遷移過程時にグリッド部が熔融燃料の放出の障害となる可能性が懸念されている。この問題に関しては、仏国 CABRI での試験および解析の結果から燃料の分散性は基本的に燃料エンタルピーで整理でき、グリッドスペーサの燃料移動に与える影響は小さいことが示されている。そのため、この燃料移動の問題に関しては、新たに試験的な実証を行う必要は無いものと考えられる。ただし、許認可を想定した場合には、ポイントを絞った試験的確認の必要性も考えられる。

これまでの実用化戦略調査研究におけるナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討においては、主に製造の容易性・コストおよび実績の観点からワイヤスペーサを採用しており、グリッドスペーサの適用に関しては、今後、製造・再処理側も含めた詳細な評価が必要になるものと考えられる。

#### (5) 高性能遮へい体開発

実用化戦略調査研究では、高性能反射体として Zr-H 遮へい体の導入を考えている。Zr-H 遮へい体について設計上留意すべき点としては、水素解離挙動と被覆管の水素透過挙動が挙げられる。具体的には、Zr-H 遮へい体の初期 H/Zr 比として 1.6 程度を想定しているが、高温条件下では Zr-H 中の水素が解離し、解離した水素が被覆管を透過し冷却材に抜けて行くことで減速能力が低下し、要求される遮へい機能を失う可能性が考えられる。

炉外試験に基づく Zr-H の水素解離の温度特性<sup>(12)</sup>および被覆管水素透過率の温度特性<sup>(13)</sup>を、それぞれ図 5.1-4、図 5.1-5 に示すが、ここで、Zr-H の水素解離は 500°C を超えると急激に大きくなる傾向にあることがわかる。また、水素透過挙動については、オーステナイト系材料ではフェライト系材料に比べ透過率が小さく、透過抑制機能に優れることがわかる。一方、照射量については、プラント寿命 60 年の使用を想定すると、遮へい体位置でもドライバ燃料並の高速中性子照射量 ( $5 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup>) に達し、オーステナイト系材料の適用は困難な見通しである。高性能遮へい体の制限条件としては、暫定的に Zr-H 最高温度を水素解離が生じない 500°C 以下と設定することとした。

参考として、大型 MOX 燃料炉心を対象に、Zr-H 遮へい体について成立性評価を行った。ここでは、遮へい体ピン本数をパラメータとして、遮へいに必要な Zr-H 体積組成を確保する条件で遮へい体構造

を設定し、Zr-H・SUS等の発熱量を計算し、遮へい体に配分可能な流量から遮へい体各部の温度評価を行った。評価結果を表5.1-4に示すが、集合体当たり7ピン以上の仕様では、Zr-Hペレット中心の温度が暫定的な制限条件である500℃を下回ることが示され、成立性を有することが認められた(参考として、図5.1-6に、7ピン構造を採用した場合のZr-H遮へい体の集合体構造を示した)。MOX燃料炉心と金属燃料炉心では、条件としてヒートバランスが若干異なる程度であり、その影響は小さいことから、金属燃料炉でもZr-H遮へい体は成立の見通しを有するものと考えられる。

ここで、今回想定した制限条件はあくまで現状の暫定条件であり、炉心部への流量を優先する観点等から温度制限を緩和することが要求されるとともに、過渡事象を想定した場合には高温条件に達することが予想される。そのため、Zr-H遮へい体の設計については、制限条件・構造(フェライト系材被覆管の内面に水素透過防止用のライナ付設等)に関し今後更なる検討が必要と考えられる。

## (6) 長寿命制御棒開発

大型金属燃料コンパクト型炉心を対象として、制御棒長寿命化の可能性について検討した。なお、本検討は、別途検討の中型MOX燃料高内部転換型炉心の原子炉停止系設計結果(寸法仕様)を参考として、寿命を支配する吸収材ペレットと被覆管の機械的相互作用(ACMI)に着目して行った。

表5.1-5に、中型MOX燃料高内部転換型炉心の核設計で設計値とした制御棒の<sup>10</sup>B装荷量の確保を条件として設定した主及び後備炉停止系制御棒の仕様を示す。表5.1-5において、仕様としては<sup>10</sup>B濃縮度を80wt%の均質としたもの、<sup>10</sup>B濃縮度を90wt%としB<sub>4</sub>Cペレット径を細径化したもの(均質型)、<sup>10</sup>B濃縮度を90wt%としB<sub>4</sub>Cの燃焼度ピークが発生しACMIが最も厳しい吸収体下端部の<sup>10</sup>B濃縮度を20wt%に下げたもの(軸方向非均質型)の3ケースである。

表5.1-6に、上記の各制御棒についてのACMI概略評価結果を示す。表5.1-6において、<sup>10</sup>B濃縮度を80wt%の均質としたケース及び90wt%の均質としたケースの場合、主及び後備炉停止系制御棒は1サイクル使用に対してはB<sub>4</sub>Cペレットと被覆管の間に有効ギャップを有しており設計成立の見通しである。しかしながら、2サイクル使用に対してはB<sub>4</sub>Cペレットと被覆管の間の有効ギャップが負となり設計成立は難しい見通しである。また、軸方向非均質型としたケースでは、主炉停止系制御棒の場合2サイクル使用に対して設計成立の見通しであるが、後備炉停止系制御棒は2サイクル使用に対して設計成立が難しい見通しである。

上記のとおり大型金属燃料コンパクト型炉心においては、主炉停止系制御棒の寿命を2サイクルとすることが可能な見通しであるが、後備炉停止系制御棒の寿命を2サイクルとするためには更なる長寿命化方策を講ずることが必要な見通しである。なお、長寿命化方策としては炉停止余裕の合理化、B<sub>4</sub>Cペレット燃焼度評価手法の合理化、パーク位置の炉心上端より上方への変更(後備炉停止系制御棒)等が考えられる。

## 5.2 今後の課題

本節で取り上げた評価項目のうち、金属燃料炉の実用化までに解決すべき重要な項目としては、「照射試験データ取得」「炉心材料」「設計制限因子」が挙げられる。これらの項目について、課題の概略を以下にをまとめた。

### (1) 照射試験データ取得

金属燃料に関しては、米国EBR-IIにおいて多くの照射実績を有しており、実用化戦略調査研究で想定している燃焼度・線出力条件については、概ね従来の照射実績の範囲に包絡されているといえる。ただし、実用化戦略調査研究の炉心では、被覆管内面温度として制限条件である650℃を想定しており、このような高温条件の照射データについてはほとんど存在していないことから、高温で高燃焼度までの実証照射試験を実施する必要がある。

(2) 炉心材料

被覆材として、高燃焼度達成のため耐スエリング性、高温強度等に優れる ODS 鋼を選定し検討を行っている。実用化戦略調査研究で目標としている炉心取出平均燃焼度 150 GWd/t を想定した場合、燃料ピンのピーク値は、燃焼度について 250 GWd/t、照射量について 250 dpa 以上に達する見通しである。一方、ODS 鋼の被覆管については、現状照射実績が乏しく到達燃焼度・照射量は制限されており、上記のレベルの高燃焼度までの健全性の実証のため照射試験が必要である。

(3) 設計制限因子

「設計制限因子」のうち、液相形成挙動については、金属燃料の健全性に大きく係わることから重要であり、「照射試験データ取得」の中で高温条件の照射試験データを拡充し、継続的に評価を行う必要がある。

表 5.1-1 金属燃料の照射実績 (IFR プログラム、定常照射)

集合体番号	X419, X420, X421	X423	X425	X430	X441	X447	X431/432	XY-24, XY-27	X482, X482A, B	IFR-1	MFF-1~6
照射炉	EBR-II	EBR-II	EBR-II	EBR-II	EBR-II	EBR-II	EBR-II	EBR-II	EBR-II	FFTF	FFTF
燃料組成 (wt%)	U-0, 8, 19Pu-10Zr	U-0, 3, 8, 19, 22, 26Pu-10Zr	U-0, 8, 19Pu-10Zr	U-0, 19, 22, 26 Pu-10Zr	U-19Pu-6, 10, 14Zr	U-10Zr	U-2, 6, 10Zr	U-8, 19Pu-10Zr	U-0, 19Pu-10Zr	U-0, 8, 19Pu-10Zr	U-10Zr
燃料スラグ長 (mm)	343	343	343	343	343	343	343	343	343	914	914
燃料スラグ径 (mm)	4.32	5.66	4.32	5.71	4.22, 4.37, 4.67	4.37	7.95	4.32	4.37	4.98	4.98
被覆管材	D9	316SS	HT-9	HT-9	HT-9	HT-9	HT-9	316SS	D9, HT-9	D9	HT-9
被覆管外径 (mm)	5.84	7.37	5.84	7.37	5.84	5.84	9.4	5.84	5.84	6.86	6.86
被覆管肉厚 (mm)	0.381	0.406	0.381	0.406	0.381	0.381	0.38, 0.51	—	—	0.56	0.56
スミア密度 (%TD)	72	74	72	75	70, 75, 85	75	85, 90	—	—	75	75
最大線出力 (W/cm)	~475	~413	~400	~500	~510	~330	394	—	—	~492	430~591
被覆管最高温度 (°C)	~580	~520	~590	~590	~600	~660	600	—	—	~600	577~649
到達ピーク燃焼度 (at%)	~18.4	~5	~19.6	~12	~11	~9.5	1.78	~7.6, ~6.6	~10, ~12.2	~10.0	14.3

表 5.1-2 ODS 代替被覆材の特性・開発見通し

	PNC-FMS 鋼	高 Ni 系材料 (国産材)	改良オーステナイト鋼 (PNC1520 鋼)	
材料特性・適用条件	高温強度	△ ・高温強度は PNC1520 鋼に比べ劣る ・630℃以上で脱炭による強度低下が大きい	◎ ・高温強度は PNC1520 鋼より優れる	○ ・オーステナイト鋼 (PNC316、D9 (米国)、1515Ti (仏国) 等) の中でクリープ破断強度は最も優れている
	照射安定性 (スエリング等)	○ ・170dpa までの実績あり ・HT-9 鋼 (米国フェライト鋼) では約 200dpa の実績あり	○ ・炭窒化物析出強度型：現状不明 ・ $\gamma'$ / $\gamma''$ 弱析出型：同様の PE16 鋼 (英国高 Ni 鋼) で優れた照射安定性を示す (150dpa の実績)	△ ・120dpa までの実績あり (最大でも ~150dpa が限界と推定される)
	照射脆化	○ ・400℃以下で延性低下 (照射硬化) ・30dpa で一様伸び 1%以上を確保	△ ・500℃以上の高温で脆化が懸念	◎ ・450℃程度以下で延性低下 (照射硬化) ・一様伸び 1%前後を確保
	MOX 燃料との共存性	○ ・共存性良好	○ ・共存性良好	○ ・共存性良好
	金属燃料との共存性	○ ・FCGI は ODS 鋼と同レベルと推定	△ ・Ni 添加材は液相形成温度低下の傾向がある	△ ・Ni 添加材は液相形成温度低下の傾向がある
	冷却材 (Na) との共存性 (腐食減肉)	○ ・フェライト鋼特有の脱炭、Ni 侵入が生じるが、腐食量はオーステナイト鋼 (PNC1520 鋼) より小さい	△ ・Ni の Na 中への選択溶出が認められ、腐食量は PNC1520 鋼より大きい	△ ・共存性は良好であるが、腐食量はフェライト鋼 (PNC-FMS 鋼) より大きい。
	製造加工性、溶接、コスト	◎ ・既存技術で対応可能。現状コストは PNC316 鋼より若干高いが大量製造により克服可能	○ ・炭窒化物析出強度型：既存技術で可 ・ $\gamma'$ / $\gamma''$ 弱析出型：熱間鍛造時の割れ発生防止が課題	◎ ・既存技術で対応可能。「常陽」MK-III の運転燃料としての実績がある。
	適用可能な照射量	○ ・照射量：~250dpa (可能性あり)	○ ・照射量：現状不明	△ ・照射量：~150dpa
	適用可能な温度	△ ・温度：~630-650℃程度	○ ・温度：~700℃程度	○ ・温度：~700℃程度
設備への影響	プラントシステムへの影響	△ ・炉心出口温度が 510℃程度 (被覆管温度 650℃に対応) に制限され、熱効率が低下 (約 2%)、SG 伝面増大 (約 50%) が懸念される。	○ ・影響なし	○ ・影響なし
	燃料取扱設備への影響	△ ・過渡/事故時の温度制限低下が懸念	○ ・燃焼度低下により取扱量増大の可能性あり	△ ・照射量の制限が律速となり燃焼度が制限される。燃焼度の低下により、取扱量の増大が懸念される。
開発見通し	開発実績	◎ ・材料強度基準 (案) 策定。材料照射、燃料ピン照射実施中。EBR-II で過渡過出力試験実施済み。	△ ・炭窒化物析出強度型：被覆管試作 ・ $\gamma'$ / $\gamma''$ 弱析出型：板材試作まで	◎ ・材料強度基準 (案) 策定。「常陽」MK-III 運転燃料に使用され十分な実績がある。120dpa の集合体照射の実績がある。
	実用化課題、難易度	◎ ・高照射データ取得、照射実績の蓄積が課題であるが、HT-9 鋼 (米国フェライト鋼) の実績から判断して、目標燃焼度の達成見込みあり。	△ ・オーステナイト鋼特有のスエリングと照射脆化の防止対策が最大の課題であり、かなりの困難が予想される。	◎ ・FFTF で実績のある 120dpa の範囲では、すでに実用化レベルにある。 ・150dpa 達成のためには照射試験が必要
	適合性判断までの期間、実用化レベル到達期間・費用	◎ ・2015 年頃までに集合体照射でピーク燃焼度 250GWd/t を達成して、最終的に適合性を判断する	△ ・試作段階での照射試験による確認と材料設計へのフィードバックが必要 ・開発は ~2020 年頃 (推定)	◎ ・150dpa 達成のための追加照射試験が必要 ・開発は ~2015 年頃 (推定)

◎：ODS 鋼より優れる ○：ODS 鋼と同程度 △：ODS 鋼より劣る

表 5.1-3 グリッドスペーサとワイヤスペーサの特徴の比較

	グリッドスペーサ	ワイヤスペーサ
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 構造材体積比を低減できる。</li> <li>・ 工学的安全係数・周辺流れ効果を低減でき、炉心出口温度の高温化が可能である。</li> <li>・ バンドル圧力損失について低減の可能性を有する（ただし、要求されるグリッド段数、グリッドの構造に依存する）。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 製造が容易であり、製造コストが安い。</li> <li>・ 多くの製造・照射実績を有している。</li> <li>・ 運転時の機械振動の影響が小さい。</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 製造が困難であり、製造コストが高い。</li> <li>・ 製造・照射実績がワイヤスペーサと比較し少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 構造材体積比が増加する傾向にある。</li> <li>・ 工学的安全係数・周辺流れ効果が大きくなる傾向にある。</li> </ul>

表 5.1-4 Zr-H 遮へい体温度評価結果

	項目	7ピン集合体	19ピン集合体	37ピン集合体
核熱評価	Zr 最大発熱量	1.22 W/cm <sup>3</sup>	1.22 W/cm <sup>3</sup>	1.22 W/cm <sup>3</sup>
	SUS 最大発熱量	1.5 W/cm <sup>3</sup>	1.5 W/cm <sup>3</sup>	1.5 W/cm <sup>3</sup>
	Na 最大発熱量	0.13 W/cm <sup>3</sup>	0.13 W/cm <sup>3</sup>	0.13 W/cm <sup>3</sup>
	最大線出力	38.4 W/cm	15.0 W/cm	8.1 W/cm
流量条件	冷却材集合体流量	0.803 kg/s	0.803 kg/s	0.803 kg/s
温度評価	冷却材温度	424.6 °C	422.1 °C	421.9 °C
	被覆管温度 (外面)	425.9 °C	422.8 °C	422.3 °C
		(内面)	426.9 °C	423.5 °C
	Zr ペレット温度 (表面)	427.5 °C	423.6 °C	422.8 °C
(中心)		441.4 °C	428.7 °C	425.5 °C

表 5.1-5 大型金属燃料コンパクト型炉心の制御棒仕様

項目		単位	主炉停止系制御棒			後備炉停止系制御棒			
			<sup>10</sup> B濃縮度均質		<sup>10</sup> B濃縮度 軸非均質	<sup>10</sup> B濃縮度均質		<sup>10</sup> B濃縮度 軸非均質	
			80wt%	90wt%		80wt%	90wt%		
B <sub>4</sub> Cペレット	外径	mm	24.6	23.6	24.8	24.6	23.6	24.8	
	理論密度比	%	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	
	<sup>10</sup> B濃縮度 (低濃縮度領域)	wt%	80	90	90 (20)	80	90	90 (20)	
被覆管	外径	mm	31.96	31.96	31.96	30.93	30.93	30.93	
	内径	mm	30.56	30.56	30.56	29.53	29.53	29.53	
	肉厚	mm	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	
シュラウド管	外側シュラウド	外径	mm	26.2	26.2	26.2	26.2	26.2	26.2
		内径	mm	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6
	内側シュラウド	外径	mm	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5
		内径	mm	24.9	24.9	24.9	24.9	24.9	24.9
制御要素	B <sub>4</sub> Cペレットスタック長 (低濃縮度領域)	mm	800	800	800 (100)	800	800	800 (100)	
	B <sub>4</sub> Cペレット-被覆管間 有効キャップ[直径]	mm	4.8	5.8	4.6	3.7	4.7	3.5	
保護管	外径	mm	167.8	167.8	167.8	162.8	162.8	162.8	
	内径	mm	161.8	161.8	161.8	156.8	156.8	156.8	
案内管	外径	mm	182.8	182.8	182.8	182.8	182.8	182.8	
	内径	mm	172.8	172.8	172.8	172.8	172.8	172.8	
集合体	制御要素本数	-	19	19	19	19	19	19	
	<sup>10</sup> B装荷量*	kg/体	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	
	体積比	B <sub>4</sub> C	%	30.1	27.7	30.6	30.1	27.7	30.6
		構造材	%	22.0	22.0	22.0	21.7	21.7	21.7
		冷却材	%	47.9	50.3	47.4	48.2	50.6	47.7
集合体配列ピッチ	mm	186.0	186.0	186.0	186.0	186.0	186.0		

\* 大型金属燃料コンパクト型炉心必要<sup>10</sup>B装荷量[核設計値] = 9.9 kg/体



表 5.1-6 大型金属燃料コンパクト型炉心の制御棒 ACMI (吸収材ペレット-被覆管相互作用) 概略評価結果

項 目		<sup>10</sup> B均質制御棒				<sup>10</sup> B軸非均質制御棒 ( <sup>10</sup> B濃縮度90/20wt%)		
		<sup>10</sup> B濃縮度80wt%		<sup>10</sup> B濃縮度90wt%		20	40	60
制御棒寿命(ヶ月)		20 [1サイクル]	40 [2サイクル]	20 [1サイクル]	40 [2サイクル]	20 [1サイクル]	40 [2サイクル]	60 [3サイクル]
主炉停止系 制御棒	B <sub>4</sub> C <sup>0</sup> ペレットピーク燃焼度 (cap/cc)	2.11E+22	4.22E+22	2.22E+22	4.44E+22	2.33E+22	3.49E+22	0.00E+00
	B <sub>4</sub> C <sup>0</sup> ペレット-被覆管間有効キヤップ° [寿命末期] * <sup>1</sup> (mm)	1.56	-1.26	2.55	-0.29	2.34	0.50	-1.33
	設計成立見通し * <sup>2</sup>	○	×	○	×	○	○	×
後備炉停止系 制御棒	B <sub>4</sub> C <sup>0</sup> ペレットピーク燃焼度 (cap/cc)	1.98E+22	3.97E+22	2.09E+22	4.17E+22	1.28E+22	2.56E+22	3.85E+22
	B <sub>4</sub> C <sup>0</sup> ペレット-被覆管間有効キヤップ° [寿命末期] * <sup>1</sup> (mm)	0.70	-1.96	1.69	-0.98	1.42	-0.31	-2.04
	設計成立見通し * <sup>2</sup>	○	×	○	×	○	×	×

\*<sup>1</sup> 燃交時(200°C)、直径キヤップ°\*<sup>2</sup> ○ : 成立 ; × : 不成立(長寿命化方策が必要)

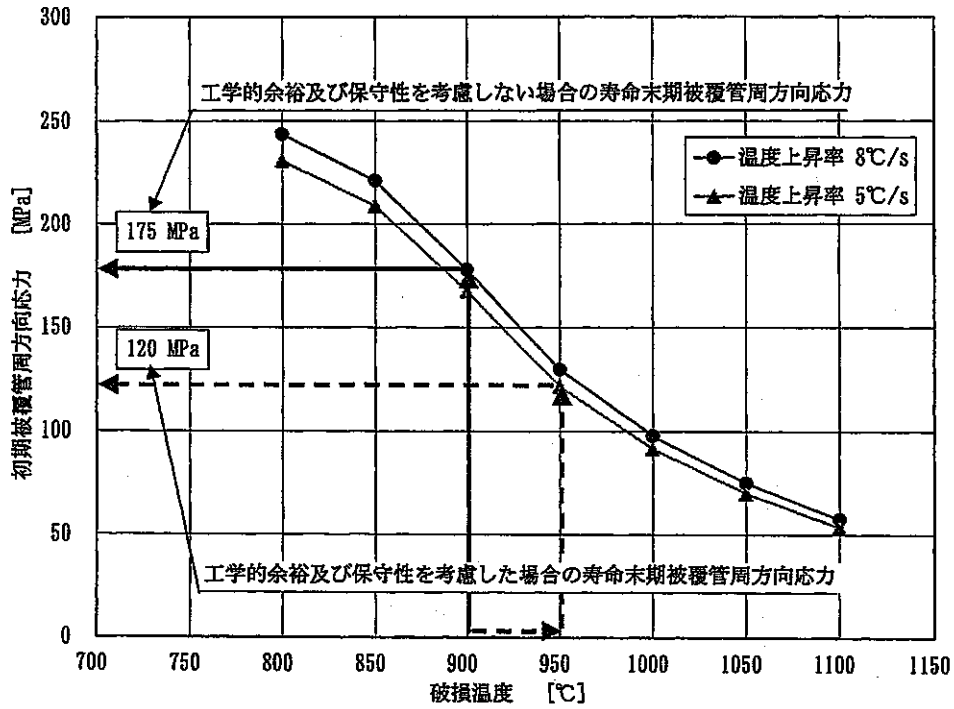


図 5.1-1 ODS 鋼のクリープ強度評価式から求めた被覆管周方向応力と破損温度の関係

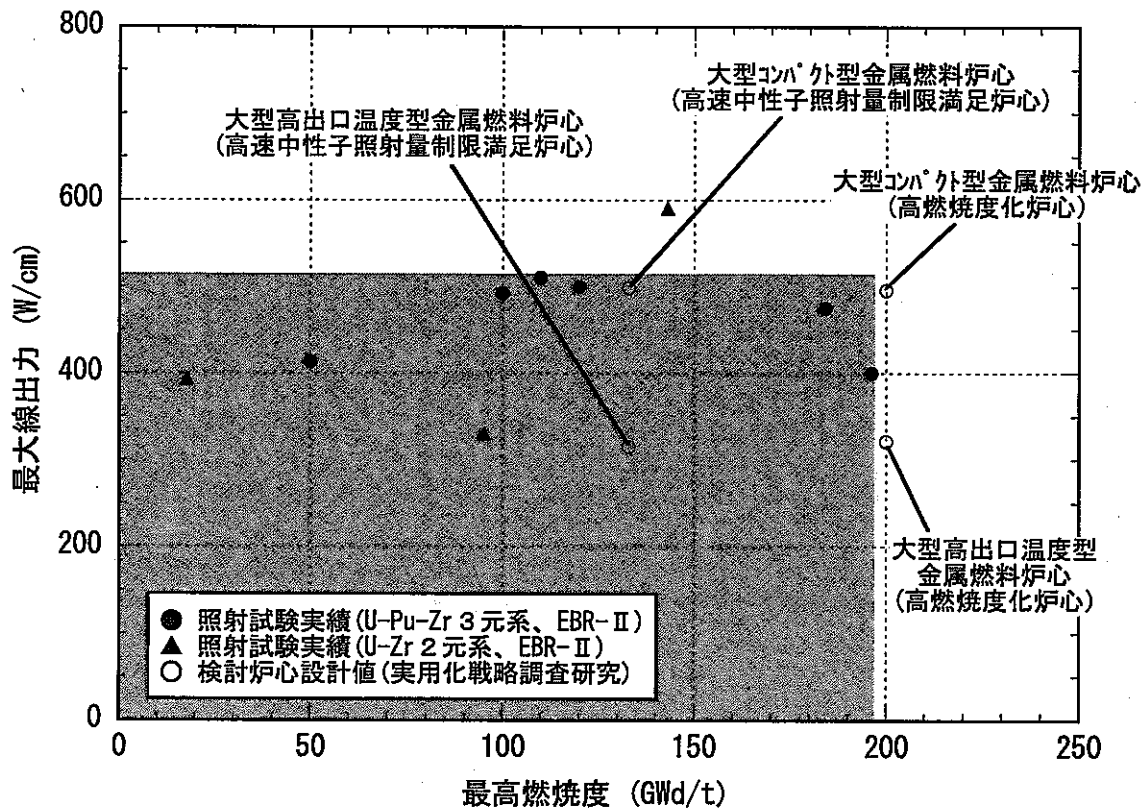


図 5.1-2 金属燃料の照射実績および実用化戦略調査研究炉心におけるターゲット

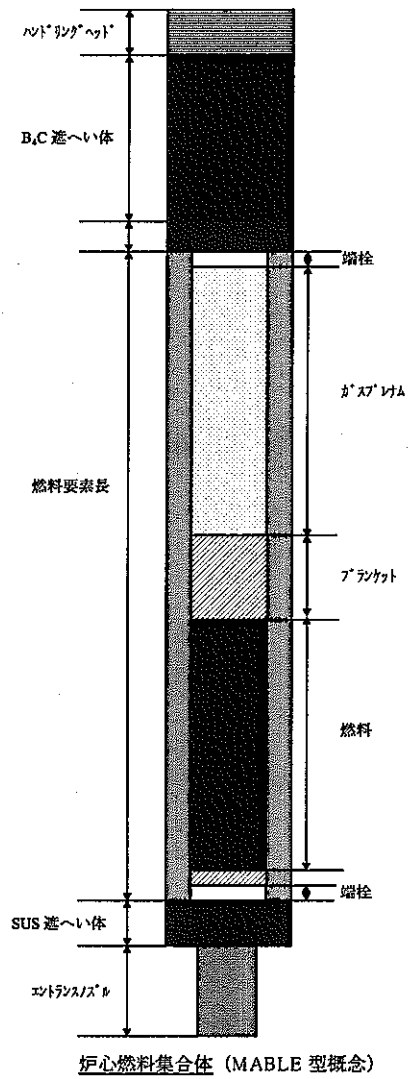


図 5.1-3 MABLE 型集合体の構造

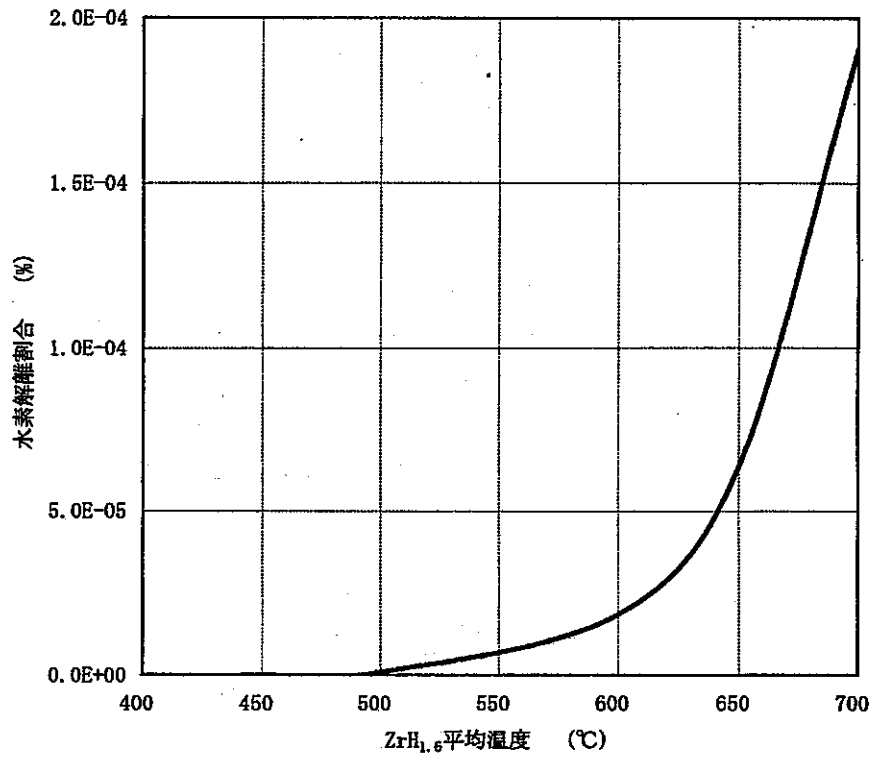


图 5.1-4 Zr-H 水素解離割合

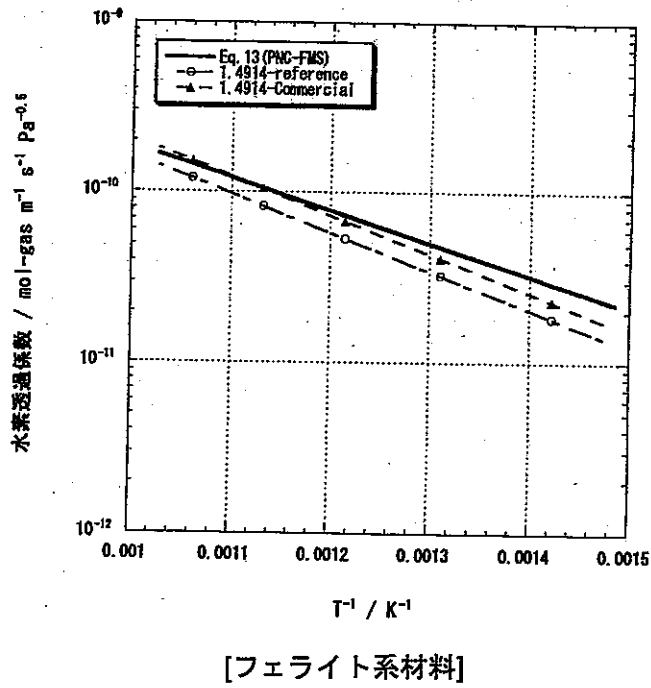
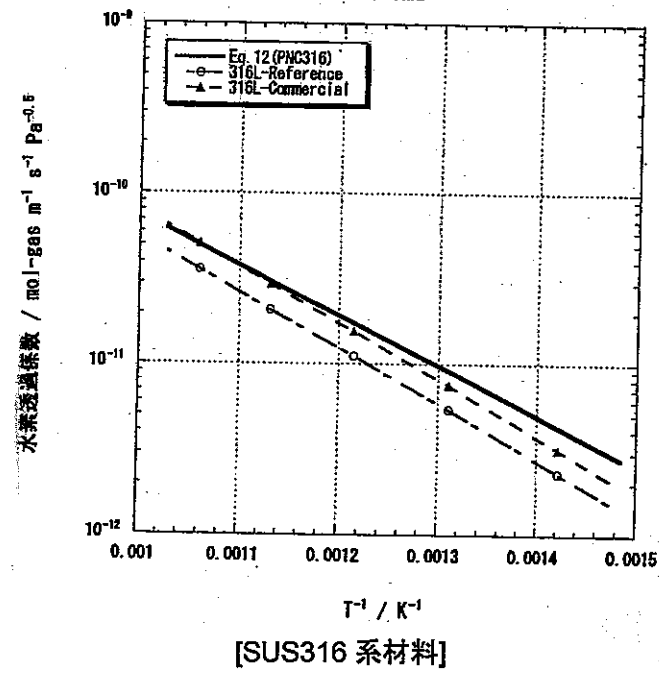
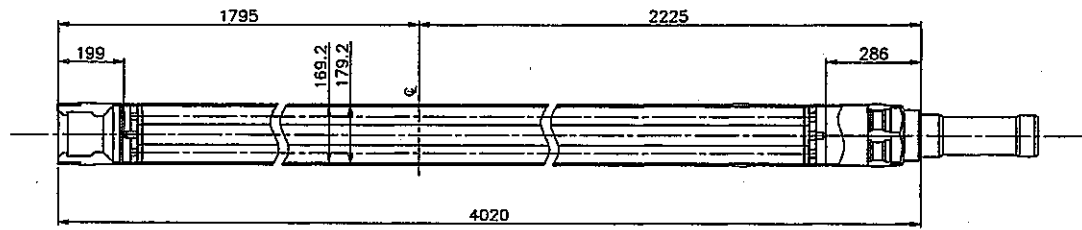
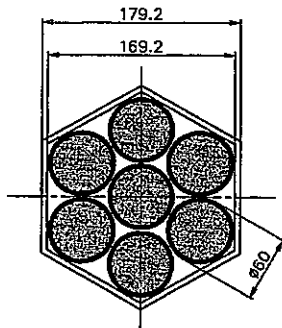


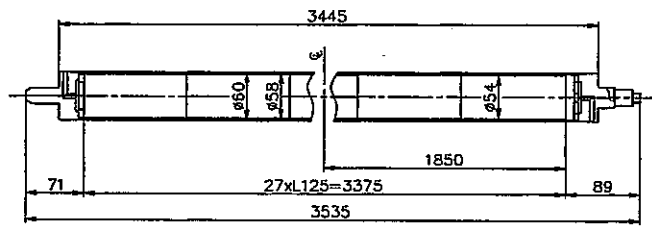
図 5.1-5 被覆管水素透過率の比較



遮蔽体



遮蔽体断面



遮蔽要素組立体

図 4.1.1.1.4(3)-3 径方向遮へい体(Zr)構造図

図 5.1-6 Zr-H 遮へい体構造概念図

## 6. おわりに

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、MOX 燃料と比較して高い増殖性能や燃料インベントリの低減が期待できる金属燃料炉心を取り上げ、大型（電気出力 1,500MWe）及び中型（750MWe）のナトリウム冷却金属燃料コンパクト型及び高出口温度型の概念を構築した。

コンパクト型炉心の構築においては、ナトリウムボイド反応度の非均質効果等の改訂を反映させて、2002 年度炉心に対して見直しを図った。高速中性子照射量制限の緩和及び照射変形量の合理化を仮定し、炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を達成する大型及び中型高燃焼度化コンパクト型導入期炉心を構築した。構築した炉心は、いずれの設計条件、設計目標も満足している。ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は 60～70GWd/t となった。最大高速中性子照射量は  $7.3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) となり ODS 鋼の開発目標である  $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{MeV}$ ) を超過する結果となっている。装荷時核分裂性 Pu 重量は 4.0～4.4t/GWe が得られ、早期導入性のポテンシャルを十分に有していることが分かった。

増殖性能の柔軟性評価として、径ブランケットの削減により平衡期炉心を構築した結果、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は 100GWd/t 程度まで高められることが分かった。また、最大高速中性子照射量を ODS 鋼の開発目標目安 ( $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{MeV}$ ) 程度とした炉心を構築した結果、炉心部取出平均燃焼度は 100GWd/t 程度に制約されるが、同じ増殖比条件ではブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は 60GWd/t 程度と高燃焼度化炉心と同等となることが分かった。

熱特性解析として、原子炉出口/入口温度 505/350℃、被覆管内面最高温度制限 650℃の条件で冷却材流量配分計画を策定し、流量配分の成立を得た。策定した流量配分計画の下、定常時の燃料健全性評価を行い、健全性が担保されていることを確認した。

他方、ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心と同等の原子炉出入口温度（550℃/395℃）を達成する大型及び中型高出口温度型炉心の構築においては、高出口温度が金属燃料炉心の新しい出力分布平坦化方策として、従来のピン径の多段階化による方法から、ピン径を単一として燃料の Zr 含有率を多段階化する方法を適用した。新しい方策の導入は 2002 年度に設定されたピン径多領域型炉心において課題とされていたナトリウムボイド反応度の低減に非常に有効であり、それに伴う設計範囲の拡大を炉心のコンパクト化に充て、炉心インベントリの低減に資することができた。また、構築した炉心は、炉心部取出平均燃焼度を除いて、ほぼ設計条件、設計目標も満足している。大型炉心については遮へい体外接円径の取り合い条件を約 10cm 超過する結果となったが、Zr 含有率を内側/外側炉心共により低下させることにより、条件を満足できる見込みである。

熱特性解析として、原子炉出口/入口温度 550/395℃の条件で開発課題縮小のためにワイヤ型スペーサの適用を想定して冷却材流量配分計画を策定した。その結果、被覆管内面最高温度について、中型炉心では 659℃、大型炉心では 655℃といずれも制限の 650℃を超過する結果となったが、工学的安全係数の合理化等により満足できる範囲内であると考えられる。また、策定した流量配分計画の下、定常時の燃料健全性評価を行い、健全性が担保されていることを確認した。

以上示した炉心は、F/S フェーズ II 中間まとめに向けて構築した炉心であり、総合評価等の幅広い視点からの検討により、ナトリウム金属燃料炉心概念の相対的ポテンシャルや課題等が明らかになるものと期待できる。

## 7. 謝辞

本研究における「大型コンパクト型金属燃料炉心」の検討は筆者の検討方針などを取り込んで三菱重工業㈱の矢野眞理氏、小倉理志氏に担当して頂き、「高出口温度型金属燃料炉心」の検討は㈱日立製作所の山舘恵氏、茨城日立情報サービス㈱の黒澤典史氏に担当して頂きました。また、「中型コンパクト型金属燃料炉心」の検討と柔軟性評価におきましては、㈱NESIの曾我彰氏と菰田宏氏に解析を協力して頂きました。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。



## 8. 参考文献

- (1) 此村守, 他: "高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ II 中間報告 -原子炉プラントシステム技術検討書-", JNC TN9400 2004-035 (2004).
- (2) 太田宏一, 他: "共同研究報告書 金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究", JNC TY9400 2001-015 (2001).
- (3) 杉野和輝, 水野朋保: "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-", JNC TN9400 2003-056 (2003).
- (4) 山館恵, 他: "原子炉出口温度高温化に適合するナトリウム冷却金属燃料炉心の検討", サイクル機構技報 No.18, JNC TN1340 2002-004 (2003).
- (5) 羽様平, 他: "高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成", JNC TN9400 2002-064 (2002).
- (6) S. K. Cheng, N. E. Todreas: "Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters", Nuclear Engineering and Design, Vol.92, P.227-251 (1986).
- (7) 水田俊治, 他: "ODS フェライト鋼被覆管の設計評価用関係式の検討", JNC TN9400 2000-048 (2000).
- (8) 鵜飼重治: "ODS フェライト-マルテンサイト鋼被覆管の組織制御技術開発", JNC TN-1340 2000-002, サイクル機構技報, No.7, p.83, (2000).
- (9) J. Bottcher, et al.: "ODS Steel Clad MOX Fuel-pin Fabrication and Irradiation Performance in EBR-II", Nuclear Technology, Vol.138, NT-6 01047 (2002).
- (10) M. Tokiwai, et al.: "Development of Eutectic Free Cladding Materials for Metallic Fuel", Proc. of ACTINIDE 2001 Int. Conf., J. of Nucl. Sci. and Technol., Supplement 3, P.913-916 (2002).
- (11) M. Naganuma, et al.: "High Burn-up Irradiation Performance of Annular Fuel Pins Irradiation in Fast Reactor PFR", Proc. of Int. Symposium on MOX Fuel Cycle Technologies for Medium and Long Term Deployment, IAEA - SM - 358 / 24 (1999).
- (12) W. Wang, D. R. Olander: "Thermodynamics of the Zr-H system, J. of American Ceramics Society", Vol.78, No.12, P.3323 - 3328 (2003).
- (13) 井上賢紀, 他: "高速炉炉心構成要素用オーステナイト系およびフェライト系ステンレス鋼の水素透過特性評価 -SUS316 相当鋼と高強度フェライト/マルテンサイト鋼の水素透過係数測定-", JNC TN9400 2002-056 (2002).

## 付録 A. 金属燃料設計制限因子

金属燃料を採用した場合の設計制限因子として、定常時の温度制限については燃料スラグと被覆管の液相形成による被覆管温度制限、定常時の燃料ピン健全性については短時間強度の制限、最大線出力に関する制限が考えられる。以下に各項目について概略を紹介する。

### (1) 定常時の温度制限

定常時の温度制限に関して、燃料スラグと被覆管の接触による液相形成挙動について概略を紹介する。金属燃料では、高温の条件において燃料スラグ周辺部で大きなポアを含む液相含有領域が形成される結果が観察されており、この液相の形成により被覆管内面の侵食が助長される結果も得られている(A-1)。液相形成挙動に関する試験として、EBR-II で 110 GWd/t 程度まで照射された金属燃料から採取した試料について、高温で一定期間保持させる高温加熱試験が実施されており(A-1)、液相形成挙動について以下のようなメカニズムが考えられている。

- ・ 定常運転中に、燃料と被覆管の相互作用の結果、被覆管成分の Fe・Cr・Ni 等が燃料中に拡散し、低融点の相を形成する。また、燃焼が進んだ燃料では核分裂生成物中のランタノイド系の FP (Ce, Nd, Pd, Sm, La) が被覆管中へ移動し Fe と低融点の相を形成する。

- ・ 過渡事象により温度が上昇し燃料-被覆管界面の温度が上昇すると、共晶点を持つ相では共晶温度を超える場合液相が形成されるとともに、その液相形成によりさらに被覆管との相互作用が助長される。

燃料設計評価上は、健全性に関し液相形成開始温度が重要であることから、上記の高温加熱試験の結果に基づき液相含有領域面積について温度と時間の関係を整理し、その結果を図 A-1、A-2 に示した。ここでは、被覆材としてフェライト/マルテンサイト鋼である HT-9 鋼を使用した燃料からのデータをプロットしており、図 A-1 は約 50 GWd/t までの中燃焼度領域、図 A-2 は約 50~100 GWd/t の高燃焼度領域のデータである。これらの図より液相は 650℃以上の領域でのみ観察され、同一時間では温度が高くなるほど、同一温度では時間が長くなるほど液相含有領域面積割合は増加する傾向にあることがわかる。液相形成面積割合の温度・時間依存性は燃焼度によって異なり、中燃焼度の燃料に比べ高燃焼度の燃料の方が、低い温度・短い時間で液相含有領域面積は大きくなる傾向にあることがわかる。このように、被覆材としてフェライト/マルテンサイト鋼を使用した燃料では、650℃以下の温度条件であれば、高燃焼度で長時間側まで液相が形成されないことが認められた(ただし、オーステナイト鋼の様な Ni を含む材料では、液相形成の開始温度が低下する特性が知られており(A-2)、この液相形成開始温度は材料に依存する温度である点に留意する必要がある)。また、Pu 富化度の依存性に関しては、参考文献(A-3)、(A-4)に Pu/(Pu+U)比をパラメータとして Fe との共晶反応試験を行った結果が示されているが、Pu の割合が増加するにつれて液相形成開始温度は低下し、Pu を含有しない U-Zr 燃料の共晶温度 725℃から Pu 割合が 0.25 程度で 650℃まで低下する傾向が認められている。そのため、Pu 富化度が低い燃料については液相開始温度を 650℃から増加できる可能性も推測される。しかし、Pu 濃度が低い試料について長時間側の加熱試験データが乏しく、長時間側で高 Pu 濃度相が形成され液相形成を導く可能性も排除できないことから、フェーズ II 中間まとめの設計評価においては Pu 富化度の依存性は考慮せず、金属燃料の液相形成開始温度として 650℃を設定することとした。

また、液相形成挙動により、スラグ中に液相含有領域が生じるだけでなく、被覆材内面の減肉を助長する挙動も得られている。高温加熱試験の結果(A-1)から、温度・加熱時間と被覆管液相侵食量の関係を図 A-3 に示した。この液相形成による被覆管減肉挙動は短時間で生じるため、過渡事象時にはこの減肉効果を考慮する必要があり健全性評価上重要であることに留意する必要がある。

### (2) 定常時の燃料ピン健全性

定常時の燃料ピン健全性に関して、通常 MOX 燃料では判断因子として CDF が制限となるが、金属燃料炉心では MOX 燃料と比べ低温条件となることから（上記の被覆管温度制限による）、ODS 鋼を採用した場合、CDF は小さく抑えられる傾向にあり、むしろ照射末期のフープ応力が制限となることがフェーズ II の検討の結果判明した。仮に CDF が制限条件の 0.5 となる仕様を設定すると、その場合、照射末期の被覆管フープ応力は 200 MPa を超える値となり、過渡・事故時には短時間強度の観点から健全性に懸念が生じるものと考えられる。そこで、フェーズ II の設計検討においては、照射末期フープ応力の制限目安値として、暫定的に MOX 燃料炉心の事故時制限温度 900°C に相当する照射末期フープ応力（事故初期フープ応力）を設定することとした。図 A-4 に ODS 鋼のクリープ強度式から評価した事故時到達温度と CDF が SR ベースで 1 となる事故初期フープ応力の関係を示すが、ここで、工学的余裕・保守性を見込まない場合、フープ応力は 175 MPa、900°C に工学的余裕 50°C と保守性として温度上昇率 5°C/s を見込んだ場合、120 MPa と見積もられることがわかった。フェーズ II の検討では、高速中性子照射量制限目安を満足する炉心については工学的余裕・保守性を考慮し照射末期フープ応力 120 MPa を、高燃焼度化炉心については 175 MPa を、制限目安値として暫定的に設定することとした。

### (3) 定常時の最大線出力

定常時の最大線出力については、従来設計検討例<sup>(2)</sup>・照射実績を参考に 500 W/cm を暫定しているが、現状、金属燃料の温度評価モデルについては検討を行っている段階であり、今後、詳細な検討が必要になるものと考えられる。

### 参考文献

(A-1) A. B. Cohen, et al.: "Fuel/Cladding Compatibility in U-19Pu-10Zr / HT-9 - clad Fuel at Elevated Temperature", J. of Nucl. Materials, 204, p244 (1993).

(A-2) H. Tsai, et al.: "Irradiation Performance of U-Pu-Zr Metal Fuels for Liquid - Metal - Cooled Reactor", Proc. of Int. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, III, p28, 2-1, (1992).

(A-3) 中村 他: "高速炉金属燃料における液相形成温度の評価 U-Pu/Fe 拡散対を用いた液相形成条件の解明", 研究報告: T99081 (2000).

(A-4) T. Ogata, et al.: "Reactions between U-Pu-Zr Alloys and Fe at 923K", J. of Nucl. Sci. and Technol., 37, p244 (2000).

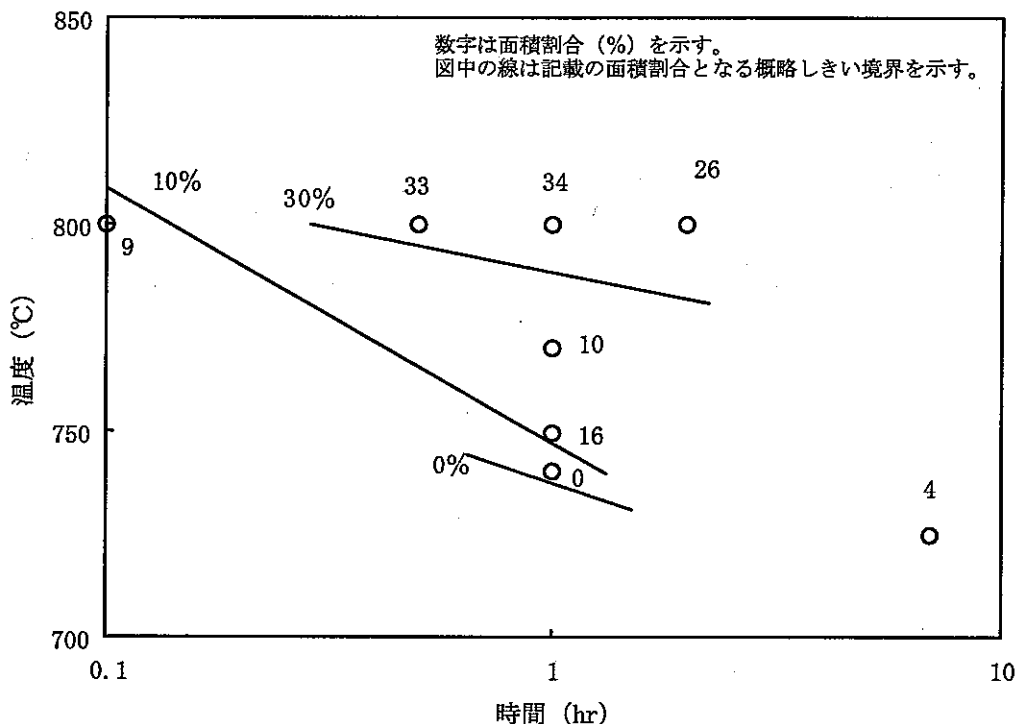


図 A-1 中燃焼度(約 5 at%)燃料における液相含有領域面積割合

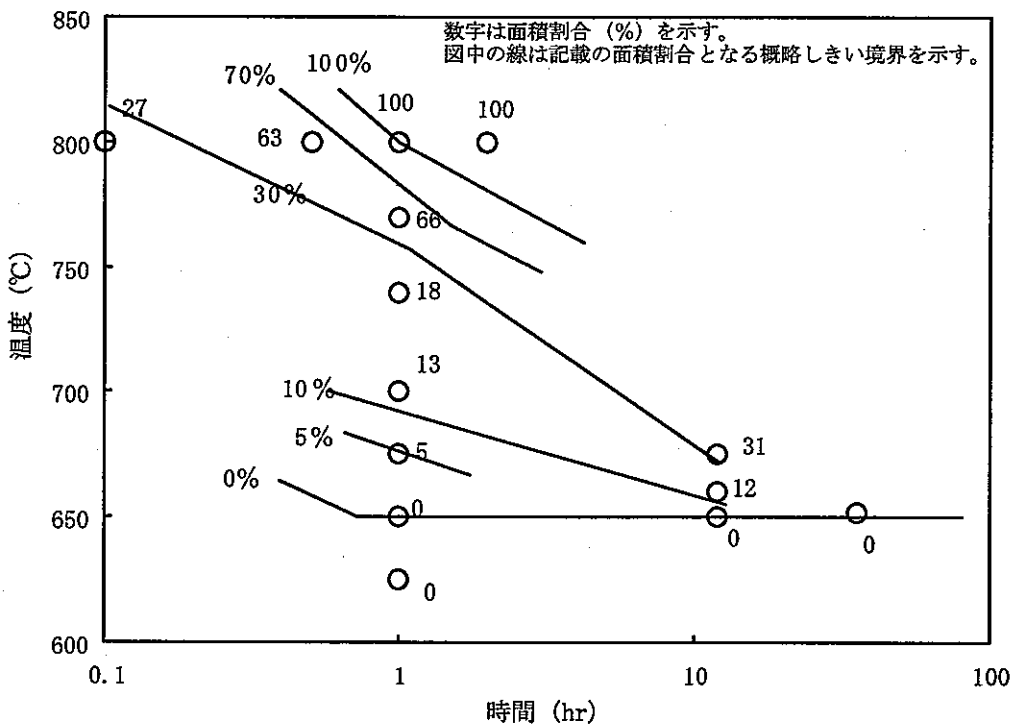


図 A-2 高燃焼度(約 10 at%)燃料における液相含有領域面積割合

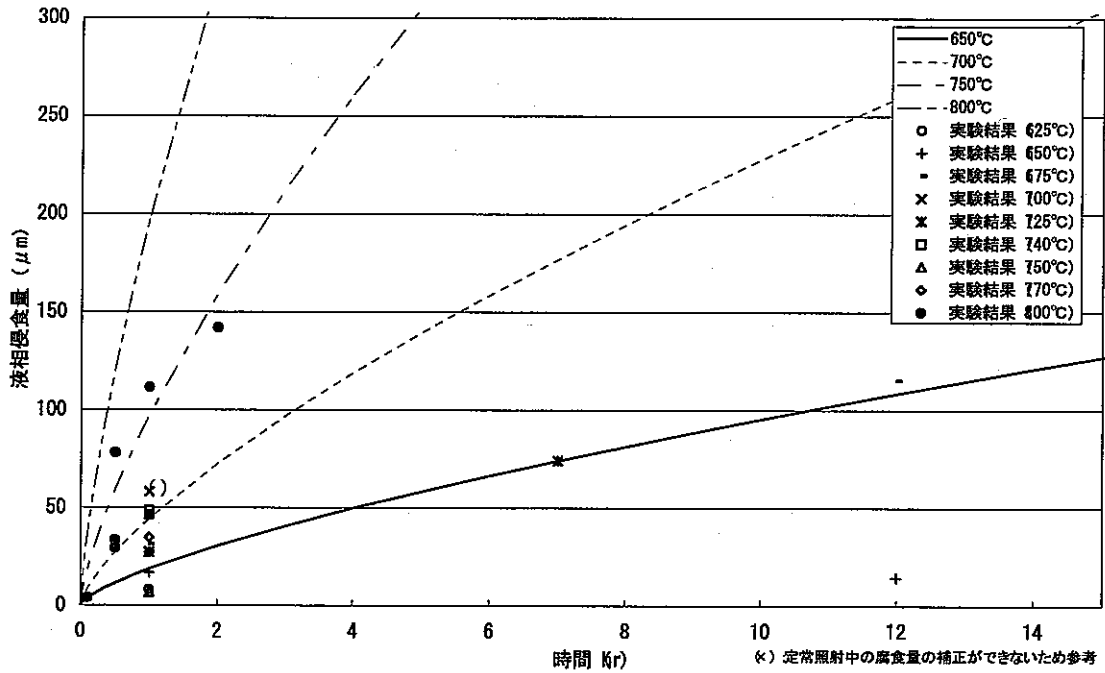


図 A-3 金属燃料の被覆管内面腐食評価式と測定結果の比較

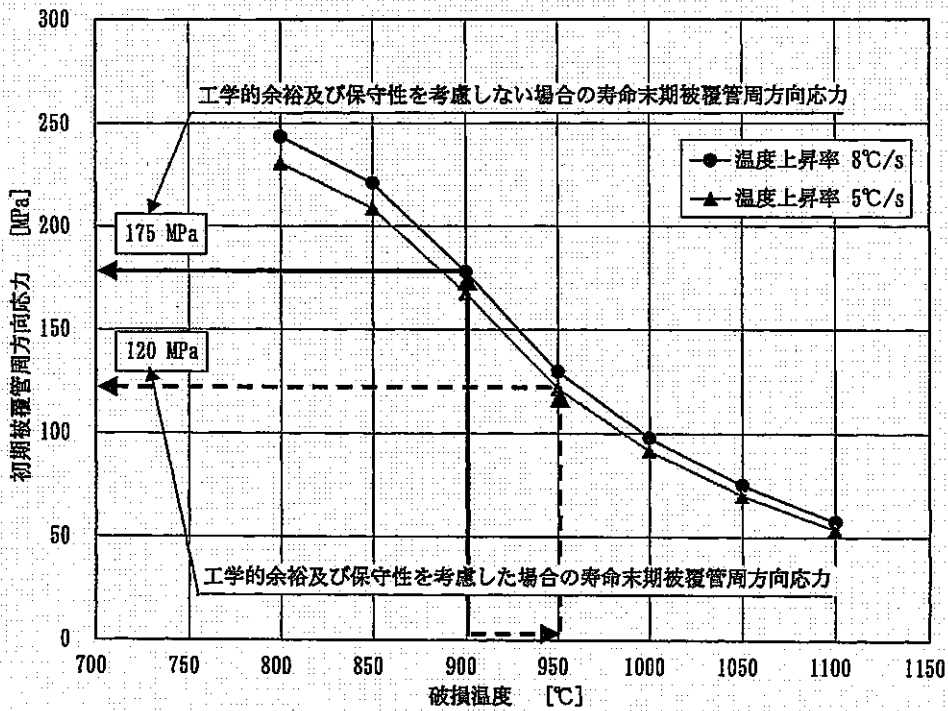


図 A-4 ODS 鋼のクリープ強度評価式から求めた被覆管周方向応力と破損温度の関係