



JAEA-Research

2006-077



JP0650718

## ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (金属燃料炉心)

- 2005 年度報告 -

Study on Reactor Core and Fuel Design of Sodium-Cooled Fast Reactor  
(Metal Fuel Core)  
- Results in JFY 2005 -

大木 繁夫 杉野 和輝 小川 隆 相田 達也\* 林 秀行

Shigeo OHKI, Kazuteru SUGINO, Takashi OGAWA  
Tatsuya AIDA\* and Hideyuki HAYASHI

次世代原子力システム研究開発部門  
炉心・燃料設計グループ

Fast Reactor Core and Fuel Design Group  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

November 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討（金属燃料炉心）  
－2005年度報告－

日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門  
FBR システムユニット  
大木 繁夫、杉野 和輝、小川 隆※、相田 達也\*、林 秀行

(2006年10月13日受理)

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）を達成可能な「ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心」の炉心・燃料設計検討を行い、実用化戦略調査研究フェーズ II の大型（電気出力 1,500 MWe）及び中型（750 MWe）代表炉心を構築した。本炉心は、単一 Pu 富化度を用い、局所内部転換比を炉心燃料のすべての領域で約 1.0 として出力分布の時間的変動を抑制し、冷却材流量配分を最適化して原子炉出口温度を高めたものである。工学的安全係数の合理化により、大型炉心は流量領域数 5、中型炉心は流量領域数 8 で、被覆管内面最高温度を金属燃料の制限である 650°C 以下とすることが可能な見通しが得られた。また、燃料健全性、遮へい体設計も成立する見通しである。中性子経済に優れる本炉心は、ブランケット無しで増殖比 1.03 を達成し、若干の上部軸方向ブランケットの付加（12~13 cm）のみで導入期炉心に必要な増殖比約 1.1 を達成できる。また、TRU 組成変動や高い増殖性能要求に対する核的な柔軟性を持つ。さらなる高出口温度化をめざし、制御棒挿入深度の詳細なモデル化や余剰反応度不確かさを合理化した時の被覆管内面最高温度の低減化を検討した。また、開発段階である ODS 鋼の代替材として PNC-FMS 鋼を被覆管材に用いた炉心を検討し、原子炉出口温度が 550°C より數度低下するものの成立性を見通せることを明らかにした。さらに、制御棒長寿命化の検討を行い、<sup>10</sup>B 濃縮度の低減、B<sub>4</sub>C ペレットの細径化により、炉心燃料と同じ 3 サイクル寿命が可能な見通しを示した。

---

大洗研究開発センター（駐在）：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002  
※ 技術開発協力員  
\* (株)東京電力

本報告書には、電力会社 9 社、電源開発株式会社および日本原子力発電株式会社による電力共通研究の成果の一部を含む。

Study on Reactor Core and Fuel Design of Sodium-Cooled Fast Reactor  
( Metal Fuel Core )  
— Results in JFY 2005 —

Shigeo OHKI, Kazuteru SUGINO, Takashi OGAWA\*,  
Tatsuya AIDA\* and Hideyuki HAYASHI

FBR System Engineering Unit  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 13, 2006)

Core and fuel design study of “the sodium-cooled metal fuel core with high reactor outlet temperature” was performed. This type of core has the potential to achieve the reactor outlet temperature of 550°C which is identical to that of a sodium-cooled mixed oxide fuel core. The reference specification of the large-scale (electric output of 1,500 MWe) and the middle-scale (750 MWe) cores were proposed as a final result of the phase-II of the feasibility study on commercialized fast reactor cycle system in Japan.

Radial power distribution of the cores is stable during the operation cycle, since the local conversion ratio of any of the core points is made close to unity with single Pu enrichment. Then, it is possible to minimize the necessary coolant flow rate for the core region and then, accept high reactor outlet temperature. By the rationalization of hot spot factors, the coolant flow distribution design can be optimized to 5 regions for the large-scale core and 8 regions for the middle-scale core respectively, satisfying the limitation of the maximum cladding inner-wall temperature of 650°C. It was also confirmed that the core specification met the criteria of fuel assembly integrity, as well as those of shielding design.

Because of superior neutronic economy, the breeding ratio of the cores reaches 1.03 without blanket fuel. The breeding ratio of 1.1, which is necessary for FBR employment period, can be achieved only by adding the upper axial blanket of 12~13 cm. The cores also have high neutronic flexibility to cope with TRU composition variation and high breeding requirement.

---

\* Cooperative Staff

\* Tokyo Electric Power Company

This report is the outcome of collaborative study between JAEA 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 System.”

For further improvement on the reactor outlet temperature condition, the reduction of the maximum cladding inner-wall temperature was investigated with the reflection of the actual control rod insertion depth and the rationalization of the excess-reactivity uncertainty.

An alternative core design was investigated by adopting the PNC-FMS steel as the cladding material instead of the ODS steel being in a developmental stage. It was turned out that the alternative core was feasible although the reactor outlet temperature deteriorated by a few degrees from 550°C.

As a result of the investigation of extending the control rod lifetime, three-cycle lifetime (which is the same as fuel assemblies) could be possible by means of the reductions in  $^{10}\text{B}$  enrichment and  $\text{B}_4\text{C}$  pellet diameter.

**Keywords:**

Commercialized Fast Reactor Cycle System, Sodium-Cooled Fast Reactor, Metal Fuel Core, Core and Fuel Design

This is a blank page.

## 目 次

1.はじめに -----	1
2.検討条件及び解析方法-----	2
3.大型高出口温度型炉心の構築-----	12
3.1 代表炉心の選定-----	12
3.2 核特性-----	12
3.3 热流力特性-----	13
3.4 燃料健全性-----	13
3.5 高出口温度型炉心とPu富化度2領域型炉心の比較検討-----	14
4.中型高出口温度型炉心の構築-----	38
4.1 代表炉心の選定-----	38
4.2 核特性-----	38
4.3 热流力特性-----	39
4.4 燃料健全性-----	39
4.5 遮へい設計成立性-----	39
5.柔軟性評価-----	58
5.1 TRU組成変動の影響-----	58
5.2 高増殖炉心の検討-----	58
6.制御棒挿入深度の詳細モデル化に係る設計合理化検討-----	66
6.1 制御棒位置偏差による出力歪みの解析-----	66
6.2 燃焼初期及び末期の制御棒挿入深度を反映した被覆管内面最高温度の低減化検討-----	67
7.ODS鋼代替炉心の検討-----	72
8.制御棒長寿命化検討-----	76
9.まとめ-----	84
謝辞-----	85
参考文献-----	86

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Conditions and calculation method -----	2
3. Core and fuel design of the large-scale core with high reactor outlet temperature	12
3.1 Selection of the representative core-----	12
3.2 Core characteristics -----	12
3.3 Thermal-hydraulic characteristics -----	13
3.4 Fuel-assembly integrity-----	13
3.5 Comparison with a core having two plutonium enrichment regions-----	14
4. Core and fuel design of the middle-scale core with high reactor outlet temperature	38
4.1 Selection of the reference core -----	38
4.2 Core characteristics -----	38
4.3 Thermal-hydraulic characteristics -----	39
4.4 Fuel-assembly integrity-----	39
4.5 Shielding design-----	39
5. Evaluation of core flexibility -----	58
5.1 Influence of TRU composition variation-----	58
5.2 Investigation of a core for high breeding-----	58
6. Investigation of design rationalization regarding the reflection of the actual control rod insertion depth-----	66
6.1 Analysis of the power distortion by position error of control rods -----	66
6.2 Reduction of the maximum cladding inner-wall temperature with reflecting the actual control rod insertion depth at the beginning and the end of the cycle-----	67
7. An alternative core design without using the ODS steel -----	72
8. Investigation of extending the control rod lifetime -----	76
9. Summary -----	84
Acknowledgment -----	85
References -----	86

## 表リスト

表 2-1	金属燃料高出口温度型炉心の主要設計条件-----	10
表 2-2	合理化後の金属燃料炉心用工学的安全係数-----	11
表 3-1	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要目（平衡期炉心）-----	16
表 3-2	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（平衡期炉心）-----	17
表 3-3	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（平衡期炉心）-----	18
表 3-4	大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心） -1 バッチ当たり平衡装荷燃料-----	19
表 3-5	大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心） -1 バッチ当たり平衡取出燃料-----	19
表 3-6	大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心） -平衡初期燃料-----	20
表 3-7	大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心） -平衡末期燃料-----	20
表 3-8	大型金属燃料高出口温度型炉心の制御反応度収支（平衡期炉心）-----	21
表 3-9	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要目（導入期炉心）-----	22
表 3-10	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（導入期炉心）-----	23
表 3-11	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（導入期炉心）-----	24
表 3-12	大型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分結果（平衡期炉心）-----	25
表 3-13	大型金属燃料高出口温度型炉心における領域内最大出力燃料要素の出力履歴（平衡期炉心）-----	25
表 3-14	大型金属燃料高出口温度型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（平衡期炉心）-----	26
表 3-15	大型金属燃料高出口温度型炉心における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力（平衡期炉心）-----	26
表 3-16	大型金属燃料高出口温度型炉心における BDI 量（平衡期炉心）-----	27
表 3-17	大型金属燃料高出口温度型炉心における DDI 量（平衡期炉心）-----	27
表 3-18	大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の主要目（平衡期炉心）-----	28
表 3-19	大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の主要燃料仕様（平衡期炉心）-----	29
表 3-20	大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の主要核特性（平衡期炉心）-----	30
表 4-1	中型金属燃料高出口温度型炉心の主要目（平衡期炉心）-----	41
表 4-2	中型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（平衡期炉心）-----	42
表 4-3	中型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（平衡期炉心）-----	43
表 4-4	中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心） -1 バッチ当たり平衡装荷燃料-----	44
表 4-5	中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心） -1 バッチ当たり平衡取出燃料-----	44
表 4-6	中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心） -平衡初期燃料-----	45

表 4-7	中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心） —平衡末期燃料—	45
表 4-8	中型金属燃料高出口温度型炉心の制御反応度収支（平衡期炉心）	46
表 4-9	中型金属燃料高出口温度型炉心の主要目（導入期炉心）	47
表 4-10	中型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（導入期炉心）	48
表 4-11	中型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（導入期炉心）	49
表 4-12	中型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分結果（平衡期炉心）	50
表 4-13	中型金属燃料高出口温度型炉心における領域内最大出力燃料要素の出力履歴（平衡期炉心）	50
表 4-14	中型金属燃料高出口温度型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（平衡期炉心）	51
表 4-15	中型金属燃料高出口温度型炉心における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力（平衡期炉心）	51
表 4-16	中型金属燃料高出口温度型炉心における BDI 量（平衡期炉心）	52
表 4-17	中型金属燃料高出口温度型炉心における DDI 量（平衡期炉心）	52
表 4-18	中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期炉心）の累積高速中性子照射量 (nvt) —軸方向下部遮へい体をステンレス鋼のみ (110 cm) とした場合—	53
表 5-1	大型金属燃料高出口温度型炉心の TRU 組成変動による炉心特性の比較（導入期炉心）	59
表 5-2	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要仕様（更なる高増殖を目指した炉心）	60
表 5-3	大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（更なる高増殖を目指した炉心）	61
表 6-1	大型金属燃料高出口温度型炉心における制御棒位置偏差時の最大出力歪み量及び出力分布誤差（平衡期炉心）	69
表 6-2	大型金属燃料高出口温度型炉心における制御棒挿入深度変更時の炉心熱流力特性（平衡期炉心）	70
表 7-1	大型金属燃料高出口温度型 ODS 鋼代替炉心のサーベイ計算結果（平衡期炉心）	74
表 7-2	大型金属燃料高出口温度型 ODS 鋼代替炉心の主要仕様および特性（平衡期炉心）	75
表 8-1	大型金属燃料高出口温度型炉心の長寿命化制御棒仕様	79
表 8-2	大型金属燃料高出口温度型炉心の長寿命化制御棒の照射特性	80

## 図リスト

図 3-1	大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（平衡期炉心）-----	31
図 3-2	大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（導入期炉心）-----	32
図 3-3	大型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分領域図（平衡期炉心）-----	33
図 3-4	Pu 富化度 2 領域型炉心の境界サーべイ時の炉心配置 -----	34
図 3-5	Pu 富化度 2 領域型炉心の境界変更時の主要核特性の変化 -----	35
図 3-6	大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の炉心配置図（平衡期炉心）-----	36
図 3-7	Pu 富化度 2 領域型炉心と高出口温度型炉心の径方向出力分布 -----	37
図 4-1	中型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（平衡期炉心）-----	54
図 4-2	中型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（導入期炉心）-----	55
図 4-3	中型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分領域図（平衡期炉心）-----	56
図 4-4	中型金属燃料高出口温度型炉心の高速中性子束等高線図（平衡期炉心） 一軸方向下部遮へい体をステンレス鋼のみ (110 cm) とした場合 -----	57
図 5-1	大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（炉心①（増殖比 1.19））-----	62
図 5-2	大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（炉心②（増殖比 1.26））-----	63
図 5-3	大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（炉心③（増殖比 1.27））-----	64
図 5-4	大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（炉心④（増殖比 1.31））-----	65
図 6-1	大型金属燃料高出口温度型平衡期炉心の流量配分領域図 (11 流量領域)	71
図 8-1	大型金属燃料高出口温度型炉心の $^{10}\text{B}$ 濃縮度と制御棒価値の関係-----	81
図 8-2	大型金属燃料高出口温度型炉心の長寿命化制御棒の概念図-----	82
図 8-3	大型金属燃料高出口温度型炉心の制御棒外側シュラウド管外径の経時変化	83

This is a blank page.

## 1. はじめに

本報告書は FBR サイクル実用化戦略調査研究（以下、FS）フェーズ II 最終年度（2005 年度）におけるナトリウム冷却金属燃料炉心に関する検討結果をまとめたものである。

金属燃料炉心に関しては、これまでに Pu 富化度 2 領域の従来型炉心に替わる革新的な炉心概念として、単一 Pu 富化度を用い、局所内部転換比を炉心燃料のすべての領域において約 1.0 として出力分布の時間的変動を抑制し、冷却材流量配分を最適化して原子炉出口温度を高める「高出口温度型炉心」の検討を行ってきた<sup>[1-3]</sup>。金属燃料炉心では、被覆管と接触した金属燃料部における液相形成防止の観点から被覆管内面温度を 650℃に制限している。このことから原子炉出口温度を MOX 燃料炉心と同等とすることは困難とされてきたが、高出口温度型炉心により原子炉出口温度を MOX 燃料炉心と同じ 550℃とすることが可能な見通しが得られている。

2004 年度は、高出口温度型炉心の出力分布平坦化のための重金属密度 2 領域化の手段として、ピン径は一定で燃料の Zr 含有率とスマア密度を変えることにより、外側炉心領域の重金属密度を高くする方法を採用した<sup>[3]</sup>。この方法は冷却材体積比が炉内で一様であり、ナトリウムボイド反応度を抑制する点で有利である。ピン径を変える場合は、内側炉心燃料のピン径の方が小さくすなわち冷却材体積比が高く、それがナトリウムボイド反応度の増加に結びついてしまう。

2005 年度の炉心検討では、2004 年度の高出口温度型炉心の設計仕様を基に、①遮へい体構成の見直しとそれに伴う炉心仕様の変更、②被覆管最高温度評価のための工学的安全係数の合理化検討とそれを用いた熱流力設計及び燃料健全性評価を行い、FS フェーズ II 代表炉心概念としての仕上げを行った。第 2 章に設計条件及び解析方法を、第 3 章に大型炉心（平衡期・導入期）の設計結果を、第 4 章に中型炉心（平衡期・導入期）の設計結果を示す。第 4 章では中型炉心を対象として行った遮へい設計成立性に関する検討結果についても述べる。なお、大型炉心を対象に TRU 組成変動や高い増殖性能要求に対する核的な柔軟性を評価した結果を第 5 章に示す。

また、さらなる高出口温度化をめざした検討として、出力分布誤差要因のうち制御棒位置偏差にかかる成分の合理化検討（第 6.1 節）、燃焼初期及び末期の制御棒挿入深度を反映した被覆管内面温度の低減化検討（第 6.2 節）を行った。

その他の検討として、ODS 鋼代替炉心の検討、制御棒長寿命化の検討を行った。第 7 章、第 8 章にそれぞれの結果を示す。

## 2. 検討条件及び解析方法

本章では金属燃料炉心の設計条件と解析方法について述べる。

### (1) 設計方針・目標

#### (a) 安全性

原子炉停止系の受動的な炉停止機能として自己作動型炉停止機構（SASS）の設置を考慮した炉心配置とした。

流量喪失スクラム失敗事象（ULOF）時の炉心崩壊事故（CDA）起因過程において、即発臨界に至らず、過剰なエネルギー放出を回避する目的から、ナトリウムボイド反応度\*を 8\$ 程度以下<sup>[4]</sup>に制限した。

\* 仮想的に炉心燃料部のラッパ管内から全ての冷却材ナトリウムを取り除いた場合

再臨界回避については、下部軸方向ブランケット削除型（MABLE 型）燃料集合体<sup>[5]</sup>を対象として設計を進めた。

#### (b) 経済性向上

運転費低減の観点から運転サイクル長期化を視野に入れて炉心を構築するものとした。また、燃料費削減の観点から先進燃料サイクル（乾式金属電解法－射出成形法）への適合性を考慮するとともに、ブランケット燃料を含めた燃料全体としての高燃焼度化を目標とした。具体的な設計目標を以下に示す。

- ・ 炉心材料は ODS 鋼及び PNC-FMS 鋼の適用を前提
- ・ 最大高速中性子照射量は ODS 鋼の開発目標である高速中性子照射量目安値  $5 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV) 以下
- ・ 全炉心取出平均燃焼度（ブランケット燃料を含む）は 60 GWd/t 程度以上
- ・ 運転サイクル長さ 18 ヶ月以上
- ・ 先進再処理システムとの整合性の観点から、低除染 TRU 燃料の使用を前提

また、金属燃料炉心の高内部転換特性を用い、原子炉出口温度を MOX 燃料炉心並みに高温化して経済性向上を実現する高出口温度型炉心概念を構築するものとした。

#### (c) 環境負荷低減

低除染 TRU 燃料の使用を前提として設計する。燃料組成は FBR 多重リサイクル組成を基本とし、LWR 使用済燃料組成について燃焼特性及び炉心特性への影響を評価した。

#### (d) 資源の有効利用

##### 1) 増殖性能

日本国内を対象とした FBR 導入シナリオの検討結果に基づき、目標とする増殖性能を MOX 燃料炉心並に設定した。すなわち、導入期炉心では増殖比 1.1 程度、初装荷核分裂性 Pu 重量を 7 t/GWe 程度以下に、一方、平衡期炉心では増殖比 1.03 程度とした。なお、増殖性能評価は低除染 TRU 燃料の使用を前提とした。

## 2) TRU リサイクル

低除染 TRU 燃料の使用を前提として設計した。燃料組成は FBR 多重リサイクル組成を基本とし、LWR 使用済燃料組成について燃焼特性及び炉心特性への影響を検討した。

### (e) 核拡散抵抗性

低除染 TRU 燃料の使用により接近性を制限する考え方とした。

## (2) 設計条件

(1)で示した設計方針・目標を基に設定した金属燃料高出口温度型炉心の設計条件を表 2-1 に示す。設計条件の根拠、詳細は以下のとおりである。

### (a) プラント仕様

大型炉、中型炉の電気出力はプラント設計上設定されているものである。高出口温度型炉心は、MOX 燃料炉心と同じ原子炉出口温度で設計することから、熱効率、熱出力、1 次系冷却材流量等の熱的条件は MOX 燃料炉心と同一である。

### (b) 炉心・燃料基本仕様

燃料形態は ANL における照射試験において、相変態を含めた熱膨張や被覆管との共存性等の点で優れた特性を示すことが示されている U-Pu-Zr の三元合金 (U-TRU-Zr 合金)<sup>[6]</sup> を選定した。本年度の高出口温度型炉心では、Pu 富化度及び燃料ピン径を全領域で同一とし、Zr 含有率及びスマア密度が互いに異なる 2 種類の燃料で炉心を構成する。Zr 含有率については標準的な仕様である 10 wt% から設計範囲を広げるものとし、照射試験で得られた知見や燃料製造への影響を抑制する観点から、暫定的に 6~10 wt% とした。ボンド材には、熱伝導に優れ、金属燃料と共存性の良いナトリウムを採用した。

TRU 組成は金属燃料 FBR の多重リサイクル組成であり、TRU 中の核分裂性 Pu の割合が 68 wt% と、MOX 燃料多重リサイクル組成中の割合 58 wt% よりも高いことが特徴である。FP 混入率は低除染乾式再処理側の条件に基づき、0.6 vol% (0.3 wt%) と設定した。

炉心材料としては、被覆管材料として ODS 鋼を、ラッパ管材料として PNC-FMS 鋼をそれぞれ採用した。

なお、金属燃料の照射実績を考慮し、許認可性の観点から燃料ピン径を 8.5 mm 以下として設計を行った。

### (c) 制限条件

#### 1) 安全設計要求

金属燃料炉心では、FS フェーズ I における炉心安全性の検討結果から、MOX 燃料炉心と比較して燃料が早期に破損・分散し易い特徴があり、それによる早期の負の反応度効果が見込まれるため、ナトリウムボイド反応度の制限は MOX 燃料の 6\$程度よりもやや高い 8\$程度としている<sup>[4]</sup>。

## 2) 燃料健全性

燃料融点は 1100°C 程度であり、MOX 燃料と比較して低いが、燃料熱伝導度が高いこと、ボンド材としてナトリウムを用いることにより、定格最大線出力として 500 W/cm 程度までを選定することが可能である。

高速中性子照射量制限は ODS 鋼の開発目標目安である  $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) とした。

被覆管最高温度は、金属燃料と被覆管との共晶反応、あるいは、被覆管と接触した金属燃料部における液相形成を防止する目的から、被覆管内面温度を 650°C 以下とした。

一次応力に基づく通常運転時の被覆管の CDF は、0.5 以下に制限した。

## (d) 取合条件

炉心燃料スミア密度については、厳しい燃料・被覆管機械的相互作用 (FCMI) が生じないという 200 GWd/t までの照射試験実績から、上限を 75%TD と設定した。下限については暫定的に 70%TD とした。

遮へい体外接円径はプラント設計側との取合条件として提示された。制御棒配置については、燃料交換機の移動のための切り込み付き炉上部機構 (UIS) に対応した配置とする必要があり、切込部において燃料交換機が移動可能なように、制御棒間隔を十分にとる必要がある。自己作動型炉停止機構 (SASS) は後備炉停止系制御棒にその機能を持たせた。燃料バンドル部圧力損失については、全自然循環方式による崩壊熱除去が可能なように、0.2 MPa 程度以下と設定した。

## (e) 炉心性能目標

設計目標で与えられているように、稼働率増加による経済性向上の観点から運転サイクル長さを 18 ヶ月以上とした。

炉心部取出平均燃焼度については、FS における目標として 150 GWd/t を設定しているが、金属燃料炉心では炉心材料の高速中性子照射量制限により 100 GWd/t 程度までしか達成できない見込みであり、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度の向上を図るものとした。

増殖比については、日本国内を対象とした FBR 導入シナリオ評価結果から導入期炉心では 1.1 程度、平衡期炉心では 1.03 程度とした。なお、初装荷炉心核分裂性 Pu 重量について、FS フェーズ II における設計条件は 7 t/GWe 以下とされているが、金属燃料炉心では高内部転換特性を活かして 5 t/GWe 程度以下を狙うものとした。

## (3) 解析方法

### (a) 炉定数、燃料組成等

- ・炉定数 : 高速炉用統合炉定数 ADJ2000R<sup>[7]</sup>
- ・燃料組成 : 金属燃料 FBR 多重リサイクル組成  

$$\begin{aligned} & {}^{238}\text{Pu} / {}^{239}\text{Pu} / {}^{240}\text{Pu} / {}^{241}\text{Pu} / {}^{242}\text{Pu} / {}^{237}\text{Np} / {}^{241}\text{Am} / {}^{243}\text{Am} / {}^{244}\text{Cm} / {}^{245}\text{Cm} \\ & = 1.1 / 66.0 / 25.2 / 2.4 / 2.4 / 0.4 / 1.6 / 0.5 / 0.4 / 0.1 \text{ wt\%} \end{aligned}$$
- ・随伴 FP : 0.6 vol% (0.3 wt%)、<sup>143</sup>Nd を代表とし FP 等価係数 1.0 を適用

(低除染乾式再処理方式との取り合いに基づく)

#### (b) 燃焼特性

Pu 富化度の設定及び燃焼反応度、増殖比等の燃焼特性解析は 2 次元 RZ70 群拡散・燃焼計算で行った。Pu 富化度設定時の運転サイクル末期実効増倍率は、運転余裕、非均質効果、輸送・メッシュ効果を考慮して 0.994 とした。

径方向の燃焼ゾーン分割は、外側炉心における急激な出力勾配が適切に評価されるよう集合体列毎に分割するものとした。

燃焼計算時の制御棒位置は平衡サイクル初期、末期ともパーク位置とし、B<sub>4</sub>C の原子数密度にリング化効果として 0.5 を乗じて解析に用いた。

燃料の燃焼に伴う径方向スエーリングによりボンド材ナトリウムはガスプレナムに押し出されるが、燃焼計算においては臨界性を保守側に評価する観点からボンド材ナトリウムが炉心燃料部に存在するものとした。

#### (c) 反応度特性

ナトリウムボイド反応度及びドップラ係数は、前記(b)項で求めた平衡炉心の燃料組成を基に、2 次元 RZ70 群拡散計算により求めた。

ナトリウムボイド反応度は、基準状態と炉心燃料部の冷却材ナトリウム（ラッパ管内）をボイド化させた場合の反応度変化を求め、この値に対し非均質効果補正 0.96 を考慮し評価値とした。

ドップラ係数は、基準状態と燃料温度のみを 500°C 増加（燃料中 Zr 温度は一定）させた場合の反応度変化を求め、この値に対し非均質効果補正 1.05 を考慮した値を評価値とした。なお、定格時の炉心領域温度 600°C は、冷却材平均温度（約 480°C）から燃料までの温度上昇幅として約 100°C を見込んで設定したものである。

動特性パラメータは、平衡炉心の燃料組成と 2 次元 18 群 RZ 拡散計算で求めた中性子束分布及び随伴中性子束分布を用い、一次摂動計算により求めた。また、このとき実効遅発中性子割合の評価で考慮する重核種は <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>242</sup>Pu の 6 核種とした。

#### (d) 最大線出力及び出力分布

最大線出力及び熱流力特性評価に用いる出力分布は、前記(b)項の燃焼特性解析で設定した Pu 富化度を基に、3 次元 7 群拡散・燃焼計算（六角修正粗メッシュモデル）により評価した。

ここで、主炉停止系制御棒は平衡サイクル初期が中途挿入、燃焼計算時は平衡サイクル初期から末期まで中途挿入とし、平衡サイクル末期において全引抜き（パーク位置）とした。制御棒挿入深度は以下の各種補正及び不確かさを考慮して設定した。

##### ・補正係数

群縮約効果	0.97
非均質効果	0.89（最新知見を反映）
輸送効果	0.96

メッシュ補正(三角→無限小)	1.07
合 計	0.89
・不確かさ(予測誤差)	9 % ( $3\sigma$ )

## (e) 制御棒価値

制御棒価値は、前記(b)項で求めた平衡炉心の燃料組成を基に、3次元7群拡散計算（三角メッシュモデル）により求めた値に基づき、以下に示す各種補正及び不確かさを考慮して評価した。このとき、ワンロッドスタック時の制御棒価値は、全数挿入時の解析値が補正係数を考慮したノミナル値と一致するように  $B_4C$  を希釈した条件で評価した。

## ・補正係数

群縮約効果	0.97
非均質効果（ランピング効果）	0.77
輸送効果	0.96
メッシュ補正(三角→無限小)	1.07
合 計	0.77
・不確かさ(予測誤差)	9 % ( $3\sigma$ )

## (f) 热流力特性

前記(d)項で評価した出力分布に基づき、炉心の流量領域区分及び各流量領域の流量配分を設定し、各流量領域の最大出力集合体（径方向出力ピーピング考慮）を対象としてサブチャンネル解析を行い、冷却材及び被覆管の最高温度を評価した。ここで、1次系流量の4%を燃料以外（制御棒、径方向遮へい体等）に、96%を燃料集合体に配分するものとした。燃料集合体のピンバンドル部の圧損及び周辺流れ効果係数の評価には Cheng-Todreas 式<sup>[8]</sup>を用いた。流量配分においては各流量領域の被覆管内面最高温度がほぼ一様となるよう設定した。冷却材及び被覆管の最高温度評価には、次項(4)に示す合理化した工学的安全係数を用いた。

## (g) 燃料健全性

前記(b)項、(d)項で評価した最大高速中性子照射量、燃料要素最高燃焼度及び前記(f)項で評価した被覆管最高温度に基づき、燃料健全性の評価を行った。評価項目は CDF、被覆管周方向応力、バンドル・ダクト間相互作用（BDI）、ダクト・ダクト間相互作用（DDI）である。

## 1) CDF 及び被覆管周方向応力

CDF 及び被覆管周方向応力評価には、実用化戦略調査研究における標準的手法である統計処理を適用した評価法を用いた。主な計算条件を以下に示す。

- ・ 燃料スミア密度の製造公差は、米国の金属燃料製造公差 $\pm 2\%$ TD を暫定
- ・ 被覆管内径及び外径の製造公差は、実証炉の製造公差を基に寸法比例で設定
- ・ 燃料要素最高燃焼度は、ノミナル計算値に不確かさ（ $\times 1.03$ ）を考慮して設定
- ・ 上部ガスプレナム容積有効率： 100%

- FP ガス放出率： 100%
- 燃料の径方向スエリングによりボンド材ナトリウムがガスプレナム部に押し出され、ガスプレナムの実効体積が減少するものとした（ガスプレナム長さの減少=炉心高さ×[下記の割合]）。
  - 内側炉心：30% (スマニア密度 70%)、外側炉心：25% (スマニア密度 75%)
- 燃料の軸方向スエリングによるガスプレナムの実効体積の減少を考慮（ガスプレナム長さの減少=炉心高さ×[下記の割合]）。
  - 内側炉心：9% (スマニア密度 70%)、外側炉心：7% (スマニア密度 75%)
- 被覆管クリープ強度式 (ODS 鋼 : FS フェーズ II 設計評価用暫定式)
 
$$\text{LMP} = (T + 273.15) (21.94 + \log_{10}(3 t_R)) / 1000$$

$$= 45.93 - 9.943 \cdot \log_{10}(S_R)$$

T : 温度 (°C)  
t<sub>R</sub> : 破断時間 (hr)  
S<sub>R</sub> : 設計クリープ破断応力強さ (MPa)  
(St ベースで適用、St = 0.8 × S<sub>R</sub>)
- 被覆管内面および外面腐食 : ODS 鋼暫定評価式<sup>[9]</sup>

判断条件については下記とした。

- CDF ≤ 0.5
- 被覆管周方向応力 ≤ 120 MPa (12.24 kgf/mm<sup>2</sup>) (目安)

## 2) バンドルダクト間相互作用 (BDI)

BDI の主な計算条件を以下に示す。

- BDI 量の定義 :

$$\text{BDI 量} = (W_{\text{bundle}} - W_{\text{duct}}) / dw$$

W<sub>bundle</sub> : 燃料要素バンドル幅  
W<sub>duct</sub> : 集合体ダクト内対面間距離  
dw : ワイヤ径

ここで、集合体ダクト内対面間距離には、ダクトのスエリングによる変形のみを考慮したもの (DS) と、スエリングによる変形量及び内外圧力差によるバルジング変形量の半分を考慮したもの (DL) が考えられるが、本検討では保守的に DS を採用した。

- 構造材のスエリング式及び照射クリープ歪み式 : 被覆管の材料は ODS 鋼であるが、PNC-FMS 鋼のスエリング式及び照射クリープ歪み式<sup>[10]</sup>を代用。保守側条件として、被覆管及びスペーサワイヤについては上限式、ラッパ管については下限式を使用。
- 被覆管腐食式 : ODS 鋼暫定評価式<sup>[9]</sup>
- 被覆管の製造公差 : CDF 評価と同様に実証炉の製造公差を基に寸法比例で設定
- 評価対象燃料集合体 : 内側炉心、外側炉心における最大発熱集合体

- ・ 高速中性子照射量： ノミナル値を使用
- ・ ラッパ管内外差圧： 集合体上部構造の圧損を 0.05 MPa と暫定して設定
- ・ 各部の軸方向温度： ノミナル値を使用

BDI の判断条件については、従来の実証炉設計で適用している制限条件（3 dw 以下）を暫定した。

### 3) ダクト一ダクト間相互作用 (DDI)

DDI の主な計算条件を以下に示す。

- ・ スエリング式及び照射クリープ歪み式： PNC-FMS 鋼の合理化上限式<sup>[10]</sup>相当
- ・ ラッパ管のバルジング膨れ量については、下記の簡易モデル式を用いた。

$$v = K \times P \times \frac{[(L+t)/\sqrt{3}]^4}{t^3} \times \frac{1}{32} \times (1 - \frac{0.5}{2})$$

$v$  : ラッパ管膨れ量 (一面、片側) [mm]  
 $K$  : 照射クリープ定数 ( $\epsilon_c/\sigma$ ) [1/MPa]  
 $P$  : ラッパ管内外差圧 [MPa]  
 $L$  : ラッパ管内対面間距離 [mm]  
 $t$  : ラッパ管肉厚 [mm]

- ・ 高速中性子照射量： ノミナル値を使用
- ・ ラッパ管内外差圧： 集合体上部構造の圧損を 0.05 MPa と暫定。不確かさは 3% を考慮。
- ・ ラッパ管温度： 炉心上端の最高温度を冷却材出口温度(550°C)とし、炉心下端から線形に上昇すると想定
- ・ ラッパ管肉厚の不確かさ： -7%考慮
- ・ ラッパ管間ギャップ余裕： 集合体湾曲変位分として 1.0 mm 考慮

判断条件については下記とした。

- ・ 従来の実証炉設計で適用している制限条件（ラッパ管同士が接触しない）を暫定した。

## (4) 工学的安全係数の合理化検討

これまでの金属燃料炉心の炉心燃料設計検討では、実証炉設計での設定を基本として、ANL における金属燃料の製造実績を燃料製作公差と燃料スラグ偏心効果に反映させた工学的安全係数を用いていた。これに対し、最新の知見を考慮するとともに、将来の技術レベルの向上を見込んで、以下のように工学的安全係数の合理化を検討した。

### (a) 出力分布誤差

出力分布誤差項のうち設計予測誤差については、炉定数調整法の高度化による断面積誤

差及び解析誤差の低減によって、従来の 4.6% ( $2\sigma$ ) から 2.2% ( $2\sigma$ ) まで低減可能な見込みである。また、これまで 2 点間の出力比の最大誤差を採用していたが、平均値に対する局所値の比の誤差へと見直すことにより、さらに設計予測誤差を 0.9% ( $3\sigma$ ) まで合理化可能な見込みである。以上、従来の 4.6% から 0.9% へ合理化した設計予測誤差と、制御棒位置偏差による出力歪み 2.3% (第 6.1 節参照) とを併せて暫定的に統計処理することにより、出力分布誤差項は 1.05 から 1.025 に合理化される。将来課題として実機データの蓄積と反映が挙げられる。

#### (b) 流路変形効果

流路変形効果の詳細解析評価により 1.025 (従来 1.03) とすることが可能と設計判断した。将来課題として実機データの蓄積と反映が挙げられる。

#### (c) 流量配分誤差

高圧プレナムからの漏れ流量低減対策、過去からの実験レベルの向上 (流量測定系の精度向上) による物性値誤差の低減、燃料集合体サイズ拡大効果の考慮により、乗算項は 1.05 から 1.040 に、統計項は 1.03 から 1.026 に合理化可能な見込みである。将来課題として流动試験が挙げられる。

#### (d) 原子炉出入口温度誤差

これまで個々の温度計の測定精度を基に設定されていたが、実際のプラントでは温度計が複数設置されており、測定結果が互いに独立であると仮定すると、個々の温度計の測定結果を統計処理することにより、温度誤差を低減化可能である。温度計が 4 個以上設置されれば、誤差は半分以下に低減可能である。以上から、原子炉出入口温度誤差項は 1.02 から 1.010 に合理化可能な見込みである。温度計の計測誤差低減に関しては、系統誤差の排除・低減等、プラント設計側の対応が将来課題として挙げられる。

#### (e) ワイヤコンタクト効果

ボンド材としてナトリウムを採用しているため、被覆管内面における熱の分散が促進され、被覆管内面の周方向温度差が緩和される。検討の結果、ワイヤコンタクト効果は 2.00 から 1.50 に合理化できる見込みである。将来課題として実機データの蓄積と反映が挙げられる。

#### (f) 燃料製作公差

燃料製造技術の向上を見込んで核分裂性 Pu 量公差目標を 3.5% と設定し、燃料製作公差誤差を 1.04 から 1.035 に合理化する。今後の課題として燃料製造設計側の対応が挙げられる。

以上の合理化結果を表 2-2 にまとめる。積み上げ後の工学的安全係数は 1.24 から 1.17 に合理化され、これにより被覆管内面最高温度 (ホットスポット温度) が 15°C 程度低下する見込みである。

表 2-1 金属燃料高出口温度型炉心の主要設計条件

項目		大型炉	中型炉
プラント仕様	電気出力	1,500MWe	750MWe
	熱出力	3,570MWt	1,785MWt
	原子炉出口/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-TRU-Zr 合金金属燃料	←
	炉心型式	均質重金属密度 2 領域	←
	Zr 含有率	6~10wt%	←
	再臨界回避方策	MABLE 型燃料集合体	←
	燃料組成	高速炉多重サイクル組成 *1	←
	FP 混入率	0.6vol% (0.3wt%)	←
	炉心材料	被覆管 ODS 鋼 *2	←
	ラッパ管	PNC-FMS 鋼 *2	←
制限条件 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	←
	最大高速中性子照射量 *3	5×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> 程度以下	←
	被覆管最高温度 *4	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	70~75%TD	←
	遮蔽体外接円径	7m 程度以下	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 程度	←
		平衡期炉心 1.03 程度	←
	取出平均燃焼度	炉心部 100GWd/t 程度	←
		全炉心 *5 60GWd/t 程度以上	←
	運転サイクル長さ	18 ヶ月 以上	←

\*1 金属燃料 FBR 多重サイクル組成 (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

\*2 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

\*3 E&gt;0.1MeV

\*4 内面

\*5 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表 2-2 合理化後の金属燃料炉心用工学的安全係数

処理	項目	工学的安全係数(HSF)		
		$\Delta T_{Na}$	$\Delta T_{Film}$	$\Delta T_{Clad}$
乗算処理	出力分布誤差	<b>1.025</b> (1.05)	<b>1.025</b> (1.05)	<b>1.025</b> (1.05)
	炉心熱出力校正誤差	1.000	1.02	1.02
	流路変形効果	<b>1.026</b> (1.03)	1.000	1.000
	集合体間流量配分誤差	<b>1.040</b> (1.05)	1.000	1.000
	原子炉出入口温度誤差	<b>1.010</b> (1.02)	1.000	1.000
統計処理	ワイヤコンタクト効果	1.000	<b>1.500</b> (2.00)	1.000
	炉内流量配分誤差	<b>1.026</b> (1.03)	1.000	1.000
	物性値誤差	1.02	1.30	1.03
	各部製造公差	<b>1.035</b> (1.04)	1.07	1.08
	燃料スラグ偏心効果	1.000	1.04	1.08

※太数字：合理化後、括弧内数字：合理化前、通常数字：見直しなし、空欄：1.0

### 3. 大型高出口温度型炉心の構築

#### 3.1 代表炉心の選定

2004年度の大型高出口温度型炉心の仕様を基に、炉心のコンパクト化を追求した新遮へい体構成を有する電気出力 1,500 MW<sub>e</sub> の大型高出口温度型代表炉心の仕様を選定した。2004年度炉心検討における遮へい体構成は、径方向はステンレス鋼反射体 2 層と B<sub>4</sub>C 遮へい体 2 層とし、軸方向は上部にガスプレナムとその上部に B<sub>4</sub>C 遮へい体を、下部にステンレス鋼遮へい体を設置していた。新遮へい体構成では、径方向はステンレス鋼反射体 1 層と中性子遮へい能力に優れる Zr-H 遮へい体 2 層による構成とし、炉心のコンパクト化を図るものとした。軸方向については、従前の遮へい設計検討の結果、上部遮へいは削減可能、下部遮へいは炉心支持板の高速中性子照射量削減のため増強が必要であることがわかった。そこで、上部はガスプレナムとステンレス鋼遮へい体とし、下部はステンレス鋼遮へい体の増長あるいはステンレス鋼遮へい体と B<sub>4</sub>C 遮へい体の組み合わせにより構成するものとした。

新遮へい体構成における炉心特性を調べた結果、径方向遮へい体構成の変更により、内側炉心と外側炉心の燃料集合体数（境界）を調整する必要が生じた。2004年度炉心と同じ内側炉心 327 体、外側炉心 318 体では、径方向のステンレス鋼反射体削減による中性子反射効果の減少により臨界性が悪化するとともに内側炉心の出力変動が増加してしまい、増殖比の目標値及び高速中性子照射量の制限値を満足しなくなる。これを改善するためには内側炉心の燃料集合体数を減らし、外側炉心の燃料集合体数を増やすことが有効であるが、重金属密度の高い外側炉心の燃料割合を増やすと取出平均燃焼度が減少することになる。そこで、増殖比の目標値及び高速中性子照射量の制限値を満足する範囲で取出平均燃焼度ができるだけ大きくなるように、内側炉心 297 体、外側炉心 348 体の構成を選定した。

一方、軸方向遮へい体については、下部に新たに設置する B<sub>4</sub>C 遮へい体が炉心特性に影響しないよう配慮し、下部ステンレス鋼遮へい体の厚さを 50 cm 程度以上とすることにした。

その他、2004年度炉心からの変更点として、上部ガスプレナム長を 176 cm から 185 cm に増加した。これは、燃料寿命末期の被覆管周方向応力を抑制するためである。

#### 3.2 核特性

選定した代表炉心（平衡期炉心）の炉心主要目と主要燃料仕様を表 3-1 及び表 3-2 に、主要核特性を表 3-3 に、物量収支を表 3-4～3-7 に、制御反応度収支を表 3-8 に、炉心配置を図 3-1 にそれぞれ示す。

主要核特性を見ると、運転サイクル長さ 21.5 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 99 GWd/t、最大高速中性子照射量  $5.3 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2 (\text{E} > 0.1 \text{ MeV})$  であり、設計条件を満足している。なお、本炉心はブランケットを有しないため、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は、炉心部取出平均燃焼度 99 GWd/t と等しくなる。したがって、本炉心は燃料サイクルコストに関して十分に高い経済性を有すると考えられる。

また、制御反応度収支は成立しており、かつ反応度停止余裕は適切であると考えられる。なお、余剰反応度の不確かさは MOX 燃料炉心を対象とした先行研究成果を基に設定しているが、その主たる要因である燃料製作公差については、再処理・燃料製造のバッチ処理に起因して Pu 富化度調整（成分調整）を Pu 含有量約 5 kg 単位で行っていることを考慮すると、炉心全体での燃料

製作公差の大幅な合理化が可能と考えられる。さらに燃料交換余裕については、本炉心の計画余剰反応度が先行研究で設計された炉心の約 6 分の 1 であることから、相応の合理化の可能性がある。

平衡期炉心に対し、上部軸方向ブランケットの付加 (12 cm) により、増殖比 1.10 程度の導入期炉心を構築した。炉心主要目と主要燃料仕様を表 3-9 及び表 3-10 に、主要核特性を表 3-11 に、炉心配置を図 3-2 に、それぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 21.5 ヶ月、増殖比 1.10、ナトリウムボイド反応度 8.3\$、炉心部取出平均燃焼度 98 GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 89 GWd/t、最大高速中性子照射量  $5.4 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) であり、設計条件を満足している。複合システム倍増時間は 66 年となった。

### 3.3 热流力特性

平衡期炉心を対象に、原子炉出入口温度が 550/395 °C の条件の下、被覆管内面最高温度制限 650 °C を満足するよう流量領域区分及び流量配分を設定し、熱流力特性を評価した。2004 年度の炉心では流量領域数を 11 領域としていたが、合理化した工学的安全係数の適用により、流量領域数を削減でき、内側炉心 2 領域、外側炉心 3 領域の計 5 領域とすることが可能となった。流量配分結果を表 3-12 に、流量領域区分を図 3-3 にそれぞれ示す。被覆管内面最高温度は 648 °C となり、制限の 650 °C を満足している。バンドル部圧力損失は最大で 0.19 MPa であり、制限の 0.2 MPa 程度以下を満足している。

なお、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 3-13、表 3-14 のとおり求めた。

### 3.4 燃料健全性

前節の熱流力特性解析結果に基づき、平衡期炉心の燃料健全性に係る検討として、CDF、被覆管周方向応力、バンドル-ダクト間相互作用 (BDI)、ダクト-ダクト間相互作用 (DDI) を評価した。

表 3-15 に各流量領域の燃料要素の CDF 値及び被覆管周方向応力を示す。寿命末期において CDF は最大で 0.123 であり、十分な余裕をもって制限の 0.5 以下の条件を満足している。寿命末期における被覆管周方向応力は、内側炉心燃料要素では 118 MPa、外側炉心燃料要素では 112 MPa となり、いずれも制限目安 120 MPa を満足している。

表 3-16 に BDI 評価結果を示す。最大の BDI 量は内側炉心燃料で現れ、-0.4 dw となっている。これは、従来の実証炉設計で適用している制限条件 (3 dw 以下) を満足する。

表 3-17 に DDI 評価結果を示す。ラッパ管間ギャップは定格運転時(入口温度: 395°C)の支持板熱膨張を考慮した場合は内側炉心が 1.20 mm、外側炉心が 1.42 mm であり、制限条件 (ラッパ管同士が接触しない) を満足している。また、支持板熱膨張の温度として燃料交換時(入口温度: 180°C)を想定した場合でも、内側炉心が 0.51 mm、外側炉心が 0.73 mm のラッパ管間ギャップであり、制限条件を満足している。

以上のように、燃料健全性に係る検討として CDF、被覆管周方向応力、BDI、DDI の評価を行った結果、いずれも制限条件を満足し、燃料健全性の成立を見通すことができた。

### 3.5 高出口温度型炉心と Pu 富化度 2 領域型炉心の比較検討

FS フェーズ II における金属燃料炉心の検討では高出口温度型炉心の他に、「もんじゅ」と同様の Pu 富化度 2 領域型炉心を検討対象とし、両者の得失を評価した<sup>[11]</sup>。高出口温度型炉心は、Zr 含有率 6 wt% における燃料健全性の実証のため多くの照射実績が必要とされるものの、原子炉出口温度の高温化やブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度の向上において優れた特性を示している。

本節では、上記の高出口温度型炉心概念の特長を明確にするため、大型高出口温度型炉心（平衡期炉心）を基に、同一出力、同一燃料インベントリの Pu 富化度 2 領域型炉心を設定して、炉心特性を定量的に比較した結果をまとめる。

#### (1) Pu 富化度 2 領域型炉心の仕様サーベイ

Pu 富化度 2 領域型炉心の仕様サーベイは、高出口温度型炉心と燃料インベントリを同一とし、炉心高さ、炉心燃料集合体総数及び集合体内ピン本数も同一（平均線出力固定）とすることを前提条件として実施した。また、内側炉心と外側炉心の燃料集合体数（領域境界）をパラメータとし、性能目標、制限条件及び取合条件を満足しつつ、包絡熱出力\*が最小となる仕様を選定するものとした。高出口温度型炉心との相違点を以下に列挙する：

- ・ スミア密度： 75 % (高出口温度型炉心では内側 70 % / 外側 75 %。重金属密度の高くなる後者を選択。)
- ・ Zr 含有率： 10 wt% (高出口温度型炉心では内側 10 wt% / 外側 6 wt%。照射実績の豊富な前者を選択。)
- ・ 燃料ピン径： 7.32 mm (高出口温度型炉心では 7.2 mm。燃料インベントリを保存するように設定。)
- ・ ワイヤ径： 1.24 mm (高出口温度型炉心では 1.26 mm。高出口温度型炉心と同じ燃料集合体最大流量 (30.5 kg/s) を想定したときに、ピンバンドル部圧損が取合条件 (0.2 MPa 程度) を満足するように設定。)
- ・ 炉心配置： 図 3-4 参照 (パラメータ。内側炉心体数割合 case A = 18.6%、case B = 31.6%、case C = 39.1%、case D = 50.7%、case E = 60.9%)

内側炉心と外側炉心の領域境界を変更したときの主要核特性を図 3-5 に示す。燃焼反応度は 0.26~0.37%Δk/kk'であり、領域境界変更の影響は小さい。増殖比は 1.018~1.035 であり、目標値 (1.03 程度) を満足するためには内側炉心の体数割合を 32%程度以下に設定する必要がある。最大高速中性子照射量は  $4.9 \sim 5.6 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  であり、高出口温度型炉心と同程度以下とするためには内側炉心の体数割合を 28%程度以上に設定する必要がある。規格化包絡熱出力 (3570MW に対する比) は 1.10~1.16 であり、内側炉心の体数割合が少ないほど包絡出力は小さくなる。

以上の結果より、Pu 富化度 2 領域型炉心の炉心配置は、性能目標及び制限条件を満足する case B (内側炉心 204 体/外側炉心 441 体) とすることにした。

\* 包絡熱出力は、流量領域区分を設定することを念頭において、集合体内の燃焼を通じて最大の出力密度を抽出・積算して集合体出力を算出して、それを積算した熱出力である。この包絡熱出力と通常の熱出力の比を規格化包絡熱出力と定義する。

## (2) Pu 富化度 2 領域型炉心の核特性評価

選定した Pu 富化度 2 領域型炉心の炉心主要目、主要燃料仕様、主要核特性を高出口温度型炉心と比較しながら、表 3-18、表 3-19、表 3-20 にそれぞれ示す。また、Pu 富化度 2 領域型炉心の炉心配置を図 3-6 に示す。

Pu 富化度 2 領域型炉心の Pu 富化度は平均で 12.6 wt%（内側炉心 10.9 wt%、外側炉心 13.3 wt%）、取出平均燃焼度が 99 GWd/t、燃焼反応度は  $0.37\%\Delta k/kk'$  である。増殖比は約 1.03、最大高速中性子照射量は  $5.2 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  であり、目標値及び制限値を満足する。最大線出力は内側炉心が 286 W/cm、外側炉心が 285 W/cm であり、制限条件を満足する。ナトリウムボイド反応度は平衡サイクル末期で 7.9 \$ であり、制限条件を満足する。ドップラ係数は平衡サイクル末期で  $-4.2 \times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$  である。これらの結果は、比較対象の高出口温度型炉心と同程度の値となっている。

しかし、図 3-7 に示すように、Pu 富化度 2 領域型炉心は燃焼に伴う出力変動が大きいため、規格化包絡熱出力は 1.12 となり、高出口温度型炉心と比較して 7%程度増加してしまう。これより被覆管内面最高温度を概算すると、約  $666^\circ\text{C}$  ( $[648^\circ\text{C}-395^\circ\text{C}] \times 1.07 + 395^\circ\text{C} = 666^\circ\text{C}$ ) となり、制限温度 ( $650^\circ\text{C}$ ) を  $16^\circ\text{C}$  超過することがわかる。被覆管内面温度制限を満足させようとすると、原子炉出口温度を  $534^\circ\text{C}$  ( $= 550^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}$ 。ただし原子炉出入口温度差を固定。) に低下しなければならない。

## (3) まとめ

以上、大型高出口温度型炉心と同等の Pu 富化度 2 領域型炉心を設定した結果、主要核特性（到達燃焼度、増殖性、最大高速中性子照射量、反応度特性等）では等価な特性が得られた。一方、原子炉出口温度の高温化については、高出口温度型炉心の原子炉出口温度  $550^\circ\text{C}$  に対し、Pu 富化度 2 領域型炉心は  $534^\circ\text{C}$  程度が限界であり、高出口温度型炉心のメリットが定量的に示された。

表 3-1 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要目 (平衡期炉心)

項目	仕様
基本仕様・炉心構成	熱出力 3,570 MWt
	電気出力 1,500 MWe
	炉心型式 MABLE 型均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ 21.5 ヶ月 (654 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径プランケット) 3/一バッチ
	炉心高さ 95 cm
	軸プランケット厚さ (上部/下部) ー/ー cm
	炉心等価直径 470 cm
	遮へい体外接円径 5.88 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計) 297 / 348 / 645 体
	径プランケット体数 0 体
	制御棒本数 (主系/後備炉停止系) 21 / 7 体
	径遮へい体数 (ステンレス鋼反射体) (ZrH 遮へい体) 96 体 (1 層) 210 体 (2 層)
炉心燃料仕様	燃料形態 U-TRU-Zr 合金
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管) ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径 7.2 mm
	被覆管肉厚 0.42 mm
	燃料スミア密度 (内側/外側炉心・軸プランケット/径プランケット) 70 / 75 / — %TD
	ワイヤ径 1.26 mm
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D) 1.18
	集合体当たり燃料ピン本数 331 本
	ラッパ管外対面間距離 167.3 mm
	ラッパ管肉厚 5.0 mm
	集合体配列ピッチ 172.4 mm
炉心主要特性	Pu 富化度 <sup>*1</sup> 12.4 wt%
	Zr 含有率 (内側/外側) 10.0 / 6.0 wt%
	炉心部取出平均燃焼度 99.2 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup> 99.2 GWd/t
	燃焼反応度 0.55 % Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側) 265 / 280 W/cm
	炉心平均出力密度 217 W/cm <sup>3</sup>
	最大高速中性子束 <sup>*3</sup> $3.1 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$
	最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup> $5.3 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$
	増殖比 1.030
	ドップラ係数 <sup>*4</sup> (平衡末期) $-4.2 \times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$
	ナトリウムボイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期) 7.8 \$ <sup>*5</sup>

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

\*4 : 非均質補正考慮、\*5 : 実効遅発中性子割合 0.00356

表 3-2 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（平衡期炉心）

項目	仕様		
	炉心	軸ブランケット	径ブランケット
燃料要素	燃料形態	U-TRU-Zr	—
	被覆管材料	ODS 鋼	—
	被覆管外径 (mm)	7.2	—
	被覆管内径 (mm)	6.36	—
	被覆管肉厚 (mm)	0.42	—
	燃料要素全長 (mm)	2,870	—
	燃料スタック長 (mm)	950	—
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,850	—
	ボンド材	ナトリウム	—
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	—
集合体	Zr 含有率 (wt%)	6~10	—
	集合体全長 (mm)	4,645	—
	燃料ピン本数 (本)	331	—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.52	—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.18	—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼	—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	167.3	—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	157.3	—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	5.1	—
	集合体配列ピッチ (mm)	172.4	—
	ワイヤ径 (mm)	1.26	—
体積比 (%)	燃料 (実効)	40.9 (28.6~30.6)	—
	構造材	24.0	—
	冷却材	35.1	—

表 3-3 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（平衡期炉心）

項目	設計値
運転サイクル長さ	21.5 ヶ月 (654 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径ブランケット)	3 / 一 バッチ
Pu 富化度 <sup>*1</sup>	12.4 wt%
Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %TD
取出平均燃焼度 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	99.2 / 一 / 一 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	99.2 GWd/t
燃焼反応度	0.55 % Δk/kk'
増殖比 (全体) (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.030 1.030 / 一 / 一
最大線出力 (内側/外側)	265 / 280 W/cm
炉心平均出力密度	217 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.000 / 一 / 一
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.1×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	5.3×10 <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/軸ブランケット/径ブランケット)	23.5 / 一 / 一 t
ブランケット/炉心重金属重量比	0
初装荷核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	4.1 t/GWe
原子炉倍増時間	—
複合システム倍増時間 <sup>*4</sup>	—
ナトリウムボイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.8 \$ <sup>*6</sup>
ドップラ係数 <sup>*5</sup> (平衡末期)	-4.2×10 <sup>-3</sup> Tdk/dT
出力係数 (平衡末期; 定格出力時)	-1.5×10 <sup>-7</sup> Δk/kk' /MWt

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

表 3-4 大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心）  
—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	軸プランケット	径プランケット	プランケット合計	合計
U-235	25.6	35.9	61.5	0.0	0.0	0.0	61.5
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	8,508.0	11,929.4	20,437.4	0.0	0.0	0.0	20,437.4
U合計	8,533.6	11,965.3	20,498.9	0.0	0.0	0.0	20,498.9
Np-237	5.0	7.0	12.0	0.0	0.0	0.0	12.0
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	5.0	7.0	12.0	0.0	0.0	0.0	12.0
Pu-238	13.7	19.3	33.0	0.0	0.0	0.0	33.0
Pu-239	824.7	1,156.2	1,980.9	0.0	0.0	0.0	1,980.9
Pu-240	314.9	441.5	756.3	0.0	0.0	0.0	756.3
Pu-241	30.0	42.0	72.0	0.0	0.0	0.0	72.0
Pu-242	30.0	42.0	72.0	0.0	0.0	0.0	72.0
Pu合計	1,213.3	1,701.0	2,914.3	0.0	0.0	0.0	2,914.3
Am-241	20.0	28.0	48.0	0.0	0.0	0.0	48.0
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	6.2	8.8	15.0	0.0	0.0	0.0	15.0
Am合計	26.2	36.8	63.0	0.0	0.0	0.0	63.0
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	5.0	7.0	12.0	0.0	0.0	0.0	12.0
Cm-245	1.2	1.8	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0
Cm合計	6.2	8.8	15.0	0.0	0.0	0.0	15.0
合計	9,784.4	13,718.9	23,503.3	0.0	0.0	0.0	23,503.3
FP <sup>*1</sup>	28.8	36.1	64.9	0.0	0.0	0.0	64.9
FP <sup>*2</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	28.8	36.1	64.9	0.0	0.0	0.0	64.9

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 3-5 大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心）  
—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	軸プランケット	径プランケット	プランケット合計	合計
U-235	7.1	15.6	22.7	0.0	0.0	0.0	22.7
U-236	3.3	3.8	7.1	0.0	0.0	0.0	7.1
U-238	7,227.1	10,705.8	17,932.9	0.0	0.0	0.0	17,932.9
U合計	7,237.6	10,725.2	17,962.8	0.0	0.0	0.0	17,962.8
Np-237	5.9	8.6	14.5	0.0	0.0	0.0	14.5
Np-239	1.8	1.7	3.4	0.0	0.0	0.0	3.4
Np合計	7.7	10.3	18.0	0.0	0.0	0.0	18.0
Pu-238	14.0	19.8	33.9	0.0	0.0	0.0	33.9
Pu-239	845.4	1,170.7	2,016.1	0.0	0.0	0.0	2,016.1
Pu-240	351.2	462.8	814.0	0.0	0.0	0.0	814.0
Pu-241	46.9	54.9	101.9	0.0	0.0	0.0	101.9
Pu-242	28.6	39.4	68.0	0.0	0.0	0.0	68.0
Pu合計	1,286.2	1,747.6	3,033.8	0.0	0.0	0.0	3,033.8
Am-241	14.0	24.0	38.0	0.0	0.0	0.0	38.0
Am-242m	1.1	1.5	2.6	0.0	0.0	0.0	2.6
Am-243	7.3	9.7	16.9	0.0	0.0	0.0	16.9
Am合計	22.4	35.2	57.6	0.0	0.0	0.0	57.6
Cm-242	1.1	1.2	2.3	0.0	0.0	0.0	2.3
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm-244	6.9	8.5	15.4	0.0	0.0	0.0	15.4
Cm-245	1.3	1.7	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0
Cm合計	9.4	11.5	20.9	0.0	0.0	0.0	20.9
合計	8,563.3	12,529.8	21,093.1	0.0	0.0	0.0	21,093.1
FP <sup>*1</sup>	28.8	36.1	64.9	0.0	0.0	0.0	64.9
FP <sup>*2</sup>	1,221.1	1,189.1	2,410.2	0.0	0.0	0.0	2,410.2
FP合計	1,249.9	1,225.3	2,475.2	0.0	0.0	0.0	2,475.2

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 3-6 大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心）  
—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	53.1	83.3	136.3	0.0	0.0	0.0	136.3
U-236	4.6	4.8	9.4	0.0	0.0	0.0	9.4
U-238	24,195.3	34,532.2	58,727.5	0.0	0.0	0.0	58,727.5
U合計	24,253.0	34,620.2	58,873.2	0.0	0.0	0.0	58,873.2
Np-237	16.2	23.0	39.2	0.0	0.0	0.0	39.2
Np-239	3.8	3.6	7.4	0.0	0.0	0.0	7.4
Np合計	20.0	26.5	46.5	0.0	0.0	0.0	46.5
Pu-238	41.1	57.6	98.7	0.0	0.0	0.0	98.7
Pu-239	2,537.9	3,510.3	6,048.2	0.0	0.0	0.0	6,048.2
Pu-240	984.3	1,347.1	2,331.3	0.0	0.0	0.0	2,331.3
Pu-241	111.5	142.2	253.7	0.0	0.0	0.0	253.7
Pu-242	87.6	122.8	210.5	0.0	0.0	0.0	210.5
Pu合計	3,762.4	5,179.9	8,942.3	0.0	0.0	0.0	8,942.3
Am-241	51.7	78.6	130.3	0.0	0.0	0.0	130.3
Am-242m	1.8	2.0	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8
Am-243	20.0	27.3	47.3	0.0	0.0	0.0	47.3
Am合計	73.5	108.0	181.5	0.0	0.0	0.0	181.5
Cm-242	2.5	2.5	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0
Cm-243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	16.9	22.6	39.5	0.0	0.0	0.0	39.5
Cm-245	3.7	5.1	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7
Cm合計	23.3	30.3	53.6	0.0	0.0	0.0	53.6
合計	28,132.2	39,965.0	68,097.2	0.0	0.0	0.0	68,097.2
FP <sup>*1</sup>	86.4	108.4	194.8	0.0	0.0	0.0	194.8
FP <sup>*2</sup>	1,221.0	1,191.7	2,412.7	0.0	0.0	0.0	2,412.7
FP合計	1,307.3	1,300.1	2,607.5	0.0	0.0	0.0	2,607.5

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 3-7 大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（平衡期炉心）  
—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	34.6	63.0	97.5	0.0	0.0	0.0	97.5
U-236	8.0	8.6	16.5	0.0	0.0	0.0	16.5
U-238	22,914.4	33,308.6	56,223.0	0.0	0.0	0.0	56,223.0
U合計	22,957.0	33,380.1	56,337.1	0.0	0.0	0.0	56,337.1
Np-237	17.1	24.6	41.7	0.0	0.0	0.0	41.7
Np-239	5.6	5.2	10.8	0.0	0.0	0.0	10.8
Np合計	22.7	29.8	52.5	0.0	0.0	0.0	52.5
Pu-238	41.4	58.1	99.5	0.0	0.0	0.0	99.5
Pu-239	2,558.7	3,524.8	6,083.4	0.0	0.0	0.0	6,083.4
Pu-240	1,020.6	1,368.4	2,389.0	0.0	0.0	0.0	2,389.0
Pu-241	128.5	155.0	283.5	0.0	0.0	0.0	283.5
Pu-242	86.3	120.2	206.5	0.0	0.0	0.0	206.5
Pu合計	3,835.4	5,226.5	9,061.9	0.0	0.0	0.0	9,061.9
Am-241	45.7	74.6	120.3	0.0	0.0	0.0	120.3
Am-242m	2.9	3.5	6.5	0.0	0.0	0.0	6.5
Am-243	21.0	28.2	49.3	0.0	0.0	0.0	49.3
Am合計	69.6	106.4	176.0	0.0	0.0	0.0	176.0
Cm-242	3.6	3.7	7.3	0.0	0.0	0.0	7.3
Cm-243	0.3	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
Cm-244	18.8	24.1	42.9	0.0	0.0	0.0	42.9
Cm-245	3.7	5.0	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7
Cm合計	26.4	33.1	59.5	0.0	0.0	0.0	59.5
合計	26,911.1	38,775.8	65,686.9	0.0	0.0	0.0	65,686.9
FP <sup>*1</sup>	86.4	108.4	194.8	0.0	0.0	0.0	194.8
FP <sup>*2</sup>	2,442.1	2,380.8	4,822.9	0.0	0.0	0.0	4,822.9
FP合計	2,528.4	2,489.3	5,017.7	0.0	0.0	0.0	5,017.7

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 3-8 大型金属燃料高出口温度型炉心の制御反応度収支（平衡期炉心）

項目	主系	後備系	
	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	1.92	0.36	0.50
a)出力補償	0.50	0.36	0.50
b)燃焼補償	0.85		
c)運転余裕	0.20		
d)燃料スエーリング補償	0.37		
2.余剰反応度の不確かさ( $2\sigma$ )	0.51	0.07	0.10
a)臨界性予測誤差	0.00		
b)出力補償予測誤差		0.07	0.10
c)燃料製作公差	0.46		
d)燃料交換余裕	0.20		
3.事故時投入反応度		0.11	0.11
必要制御反応度	2.83*	0.54	0.71
補正後制御棒価値	3.99	0.95	1.12
反応度停止余裕	1.16	0.41	0.41

単位: % $\Delta k/kk'$ \*: 炉停止余裕 1\$ (0.4% $\Delta k/kk'$ )を考慮

表 3-9 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要目 (導入期炉心)

項目	仕様
基本仕様・炉心構成	熱出力 3,570 MWt
	電気出力 1,500 MWe
	炉心型式 MABLE 型均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ 21.5 ヶ月 (654 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径プランケット) 3/一バッチ
	炉心高さ 95 cm
	軸プランケット厚さ (上部/下部) 12/- cm
	炉心等価直径 470 cm
	遮へい体外接円径 5.88 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計) 297 / 348 / 645 体
	径プランケット体数 0 体
	制御棒本数 (主系/後備炉停止系) 21 / 7 体
炉心燃料仕様	径遮へい体数 (ステンレス鋼反射体) (ZrH 遮へい体) 96 体 (1 層) 210 体 (2 層)
	燃料形態 U-TRU-Zr 合金
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管) ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径 7.2 mm
	被覆管肉厚 0.42 mm
	燃料スミア密度 (内側/外側炉心・軸プランケット/径プランケット) 70 / 75 / - %TD
	ワイヤ径 1.26 mm
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D) 1.18
	集合体当たり燃料ピン本数 331 本
	ラッパ管外対面間距離 167.3 mm
	ラッパ管肉厚 5.0 mm
	集合体配列ピッチ 172.4 mm
炉心主要特性	Pu 富化度 <sup>*1</sup> 12.1 wt%
	Zr 含有率 (内側/外側) 10.0 / 6.0 wt%
	炉心部取出平均燃焼度 97.6 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup> 88.8 GWd/t
	燃焼反応度 0.23 %Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側) 255 / 269 W/cm
	炉心平均出力密度 213 W/cm <sup>3</sup>
	最大高速中性子束 <sup>*3</sup> $3.2 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
	最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup> $5.4 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup>
	増殖比 1.101
	ドップラ係数 <sup>*4</sup> (平衡末期) $-4.2 \times 10^{-3}$ Tdk/dT
	ナトリウムボイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期) 8.3 \$ <sup>*5</sup>

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

\*4 : 非均質補正考慮、\*5 : 実効遅発中性子割合 0.00356

表 3-10 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（導入期炉心）

項目	仕様		
	炉心	軸ブランケット	径ブランケット
燃料要素	燃料形態	U-TRU-Zr	U-Zr
	被覆管材料	ODS 鋼	—
	被覆管外径 (mm)	7.2	—
	被覆管内径 (mm)	6.36	—
	被覆管肉厚 (mm)	0.42	—
	燃料要素全長 (mm)	2,990	—
	燃料スタック長 (mm)	950	120 / — (上部/下部)
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,850	—
	ボンド材	ナトリウム	—
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	←
集合体	Zr 含有率 (wt%)	6~10	10
	集合体全長 (mm)	4,765	—
	燃料ピン本数 (本)	331	—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.52	—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.18	—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼	—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	167.3	—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	157.3	—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	5.1	—
	集合体配列ピッチ (mm)	172.4	—
	ワイヤ径 (mm)	1.26	—
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0	—
体積比 (%)	燃料 (実効)	40.9 (28.6~30.6)	←
	構造材	24.0	←
	冷却材	35.1	←

表 3-11 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（導入期炉心）

項目	設計値
運転サイクル長さ	21.5 ヶ月 (654 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径ブランケット)	3 / — バッチ
Pu 富化度 <sup>*1</sup>	12.1 wt%
Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %TD
取出平均燃焼度 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	97.6 / 15.0 / — GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	88.8 GWd/t
燃焼反応度	0.23 % Δk/k'
増殖比 (全体) (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.101 1.032 / 0.069 / —
最大線出力 (内側/外側)	255 / 269 W/cm
炉心平均出力密度	213 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	0.982 / 0.018 / —
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.2×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	5.4×10 <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/軸ブランケット/径ブランケット)	23.5 / 2.8 / — t
ブランケット/炉心重金属重量比	約 0.1
初装荷核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	4.0 t/GWe
原子炉倍増時間	47 年
複合システム倍増時間 <sup>*4</sup>	66 年
ナトリウムボイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	8.3 \$ <sup>*6</sup>
ドップラ係数 <sup>*5</sup> (平衡末期)	-4.2×10 <sup>-3</sup> Tdk/dT

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

表 3-12 大型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分結果（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	集合体数	集合体最大出力	集合体流量	領域流量	必要冷却材量	最高温度	被覆管内面最高温度 <sup>*2</sup>	バンドル部圧力損失	
内側炉心	1	192	6.94	29.6	5683.2	632	647	647	0.18	
	2	105	6.24	26.6	2793.0	634	648	648	0.15	
	3	174	7.05	30.5	5307.0	631	647	647	0.19	
外側炉心	4	84	5.34	24.3	2041.2	635	648	648	0.13	
	5	90	3.71	18.3	1647.0	637	647	647	0.08	
	合計(最大値)	645	(7.05)	(30.5)	17471.4	(637)	(648)	(648)	(0.19)	
		炉心流量 <sup>*1</sup> [kg/s]		17472.0						
		余剰流量 [kg/s]		+0.6 (+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: 1.16～1.17、周辺流れ効果係数計算結果: 1.097

表 3-13 大型金属燃料高出口温度型炉心における領域内最大出力燃料要素の出力履歴（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	燃料ピッジ最大出力 [kW]			寿命中平均出力 [kW]
		装荷第1サイクル	装荷第2サイクル	装荷第3サイクル	
内側炉心	1	20.6	21.1	20.8	20.4
	2	18.1	19.1	18.5	18.5
外側炉心	3	21.6	21.8	21.5	21.1
	4	18.1	17.0	18.1	16.5
	5	13.7	12.9	13.8	12.9

表 3-14 大型金属燃料高出口温度型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（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	被覆管肉厚中心ホットスポット温度 [°C]					
		装荷第1サイクル		装荷第2サイクル		装荷第3サイクル	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
内側炉心	1	637	643	642	639	637	634
	2	630	644	637	641	634	637
	3	639	642	640	639	638	634
	4	644	629	644	626	643	622
	5	640	625	641	625	641	624

表 3-15 大型金属燃料高出入口温度型炉心における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	被覆管肉厚中心ホットスポット温度 [°C]		燃料ピン最高燃焼度 [MWd/t]	被覆管周方向応力 [MPa]	CDF
		最高	寿命末期			
内側炉心	1	643	634	140,400	118	0.123
	2	644	637	125,600	102	0.028
	3	642	634	121,500	112	0.008
	4	644	622	98,200	84	0.002
	5	641	624	75,400	61	0.0001

表 3-16 大型金属燃料高出口温度型炉心における BDI 量 (平衡期炉心)

項目		内側炉心	外側炉心
BDI量 (mm) ミナル温度条件	平均 * <sup>1</sup>	-0.87 (-0.7 dw)	-0.95 (-0.8 dw)
	最大 * <sup>2</sup>	-0.61 (-0.5 dw)	-0.69 (-0.5 dw)
不確かさを考慮した 高温側温度条件	平均 * <sup>1</sup>	-0.91 (-0.7 dw)	-0.98 (-0.8 dw)
	最大 * <sup>2</sup>	-0.65 (-0.5 dw)	-0.73 (-0.6 dw)
不確かさを考慮した 低温側温度条件	平均 * <sup>1</sup>	-0.84 (-0.7 dw)	-0.91 (-0.7 dw)
	最大 * <sup>2</sup>	-0.56 (-0.4 dw)	-0.65 (-0.5 dw)

\*<sup>1</sup> ラッパ管平均内対面幅\*<sup>2</sup> ラッパ管最小内対面幅

表 3-17 大型金属燃料高出口温度型炉心における DDI 量 (平衡期炉心)

項目		内側炉心	外側炉心
ラッパ管間 ギャップ (mm)	20°C(常温) → 395°C(通常 運転時)の支持板熱膨張	1.20	1.42
	20°C(常温) → 180°C(燃料 交換時)の支持板熱膨張	0.51	0.73
	支持板膨張参考(参考)	(0.06)	(0.28)

表 3-18 大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の主要目 (平衡期炉心)

項目	高出口温度型炉心	Pu 富化度 2 領域型炉心
基本仕様・炉心構成	熱出力	3,570 MWt
	電気出力	1,500 MWe
	炉心型式	MABLE 型 均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	21.5 ヶ月 (654 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径プランケット)	3/一バッチ
	炉心高さ	95 cm
	軸プランケット厚さ (上部/下部)	—/— cm
	炉心等価直径	470 cm
	遮へい体外接円径	5.88 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	297 / 348 / 645 体
	径プランケット体数	0 体
	制御棒本数 (主系/後備炉停止系)	21 / 7 体
	径遮へい体数 (ステンレス鋼反射体) (ZrH 遮へい体)	96 体 (1 層) 210 体 (2 層)
炉心燃料仕様	燃料形態	U-TRU-Zr 合金
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	7.2 mm
	被覆管肉厚	0.42 mm
	燃料スマア密度 (内側/外側炉心・軸プランケット/径プランケット)	70 / 75 / — %TD
	ワイヤ径	1.26 mm
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D)	1.18
	集合体当たり燃料ピン本数	331 本
	ラッパ管外対面間距離	167.3 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
	集合体配列ピッチ	172.4 mm
炉心主要特性	Pu 富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側/平均)	12.4 / 12.4 / 12.4 wt%
	Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%
	炉心部取出平均燃焼度	99.2 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	99.2 GWd/t
	燃焼反応度	0.55 %Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側) <sup>*3</sup>	255 / 275 W/cm
	炉心平均出力密度	217 W/cm <sup>3</sup>
	最大高速中性子束 <sup>*4</sup>	3.1×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
	最大高速中性子照射量 <sup>*4</sup>	5.3×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>
	増殖比	1.030
	ドップラ係数 <sup>*5</sup> (平衡末期)	-4.2×10 <sup>-3</sup> Tdk/dT

\*1 : Pu/HM、\*2 : プランケット燃料を含む全体の取出平均燃焼度、\*3 : 2 次元 RZ 計算値、燃焼ミスマッチファクタ考慮、\*4 : E > 0.1 MeV、\*5 : 非均質補正考慮、\*6 : 実効遅発中性子割合 0.00356

表 3-19 大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の主要燃料仕様（平衡期炉心）

項目	高出口温度型炉心	Pu 富化度 2 領域型炉心
燃料要素	燃料形態	U-TRU-Zr ←
	被覆管材料	ODS 鋼 ←
	被覆管外径 (mm)	7.2 7.32
	被覆管内径 (mm)	6.36 6.46
	被覆管肉厚 (mm)	0.42 0.43
	燃料要素全長 (mm)	2,870 ←
	燃料スタック長 (mm)	950 ←
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,850 ←
	ボンド材	ナトリウム ←
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75 75
集合体	Zr 含有率 (wt%)	6~10 10
	集合体全長 (mm)	4,645 ←
	燃料ピン本数 (本)	331 ←
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.52 8.62
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.18 1.18
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼 ←
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	167.3 169.1
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	157.3 159.1
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0 ←
	ラッパ管間ギャップ (mm)	5.1 5.2
	集合体配列ピッチ (mm)	172.4 174.3
	ワイヤ径 (mm)	1.26 1.24
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0 ←
体積比 (%)	燃料 (実効)	40.9 (28.6~30.6) 41.2 (30.9)
	構造材	24.0 24.0
	冷却材	35.1 34.7

表 3-20 大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の主要核特性（平衡期炉心）

項目	高出口温度型炉心	Pu 富化度 2 領域型炉心
運転サイクル長さ	21.5 ヶ月 (654 日)	←
燃料交換バッチ数 (炉心/径ブランケット)	3 / 一バッチ	←
Pu 富化度 <sup>*1</sup> (内側/外側/平均)	12.4 / 12.4 / 12.4 wt%	10.9 / 13.3 / 12.6 wt%
Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	10.0 / 10.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %TD	75 / 75 %TD
取出平均燃焼度 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	99.2 / — / — GWd/t	99.2 / — / — GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	99.2 GWd/t	99.2 GWd/t
燃焼反応度	0.55 % Δk/kk'	0.37 % Δk/kk'
増殖比 (全体) (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.030 1.030 / — / —	1.030 1.030 / — / —
最大線出力 (内側/外側) <sup>*3</sup>	255 / 275 W/cm	286 / 285 W/cm
炉心平均出力密度	217 W/cm <sup>3</sup>	212 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.000 / — / —	1.000 / — / —
最大高速中性子束 <sup>*4</sup>	$3.1 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.0 \times 10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*4</sup>	$5.3 \times 10^{23}$ 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/軸ブランケット/径ブランケット)	23.5 / — / — t	23.5 / — / — t
ブランケット/炉心重金属重量比	0	0
初装荷核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	4.1 t/GWe	4.2 t/GWe
原子炉倍増時間	—	—
複合システム倍増時間 <sup>*5</sup>	—	—
ナトリウムボイド反応度 <sup>*6</sup> (平衡末期)	7.8 \$ <sup>*7</sup>	7.9 \$ <sup>*7</sup>
ドップラ係数 <sup>*6</sup> (平衡末期)	$-4.2 \times 10^{-3}$ Tdk/dT	$-4.2 \times 10^{-3}$ Tdk/dT
包絡熱出力 <sup>*3, *8</sup>	3756 MWt	4011 MWt
規格化包絡熱出力 (3570MWt に対する比) <sup>*3, *8</sup>	1.05	1.12

<sup>\*1</sup>: Pu/HM<sup>\*2</sup>: ブランケット燃料を含む全体の取出平均燃焼度<sup>\*3</sup>: 2 次元 RZ 計算値、燃焼ミスマッチファクタ考慮<sup>\*4</sup>: E > 0.1 MeV<sup>\*5</sup>: 燃料炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日<sup>\*6</sup>: 非均質補正考慮<sup>\*7</sup>: 実効遅発中性子割合 0.00356<sup>\*8</sup>: 各リンクの最大軸方向積分出力で求めた出力の合計値

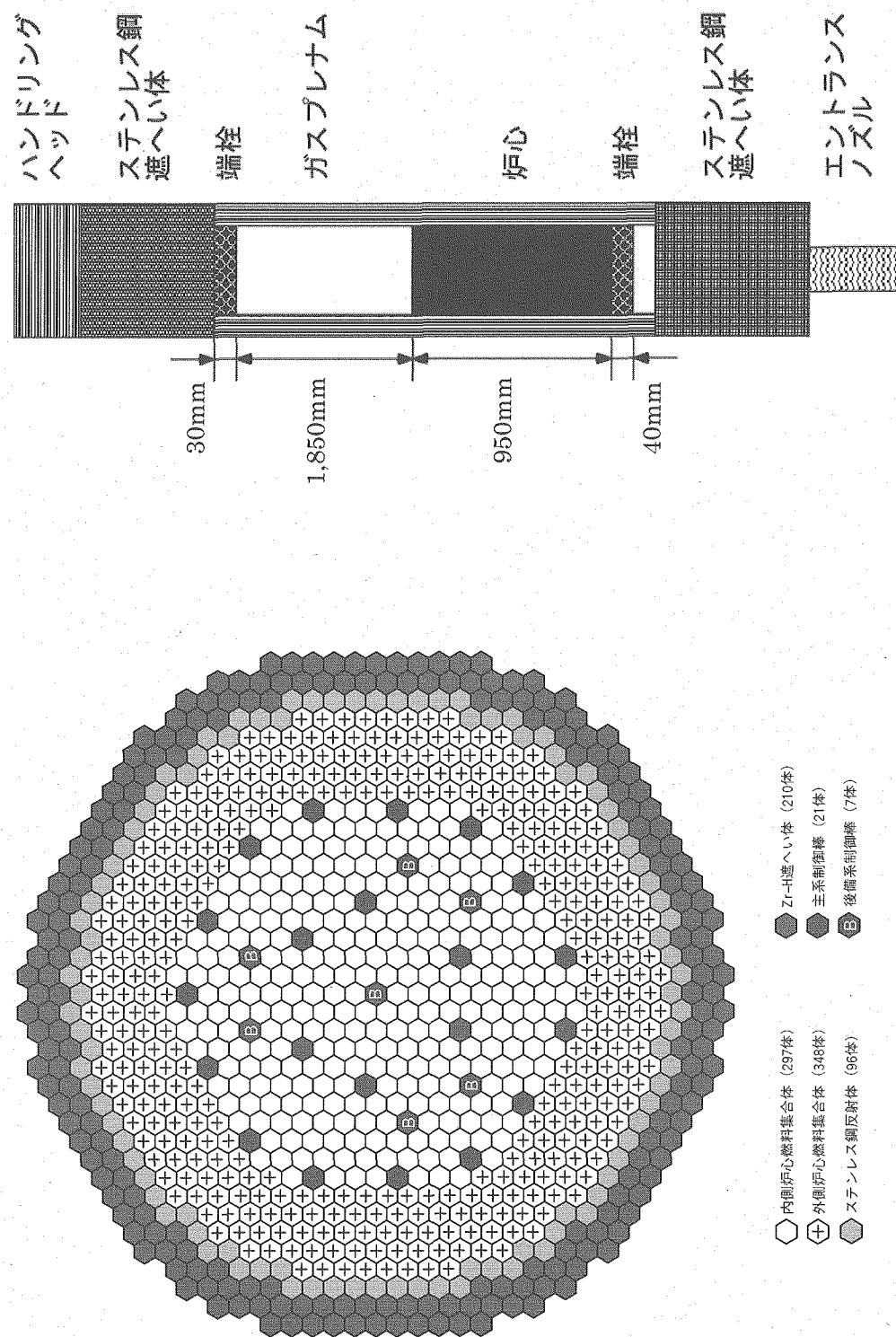
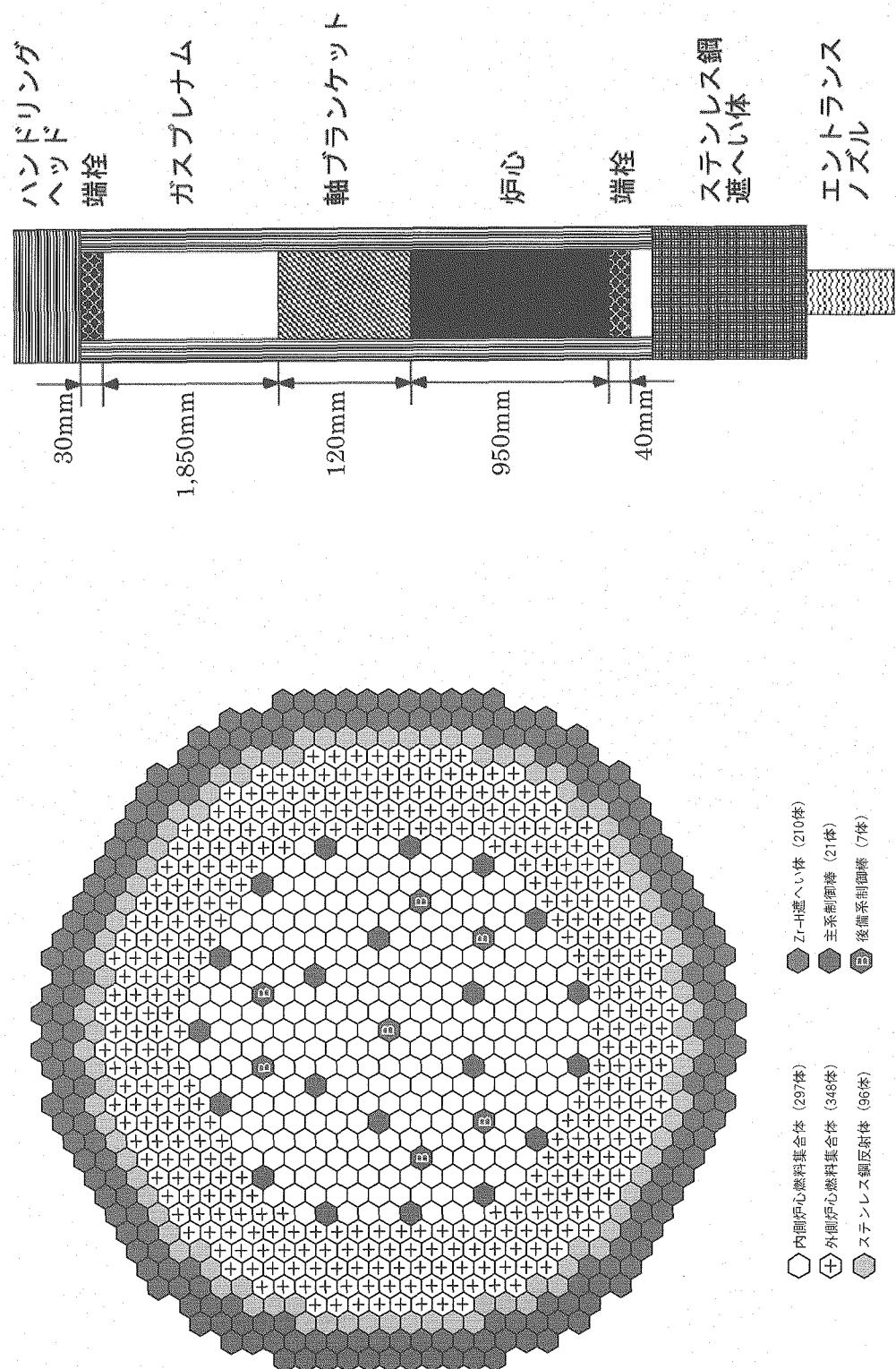


図 3-1 大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（平衡期炉心）



3分の1炉心（回転対称）

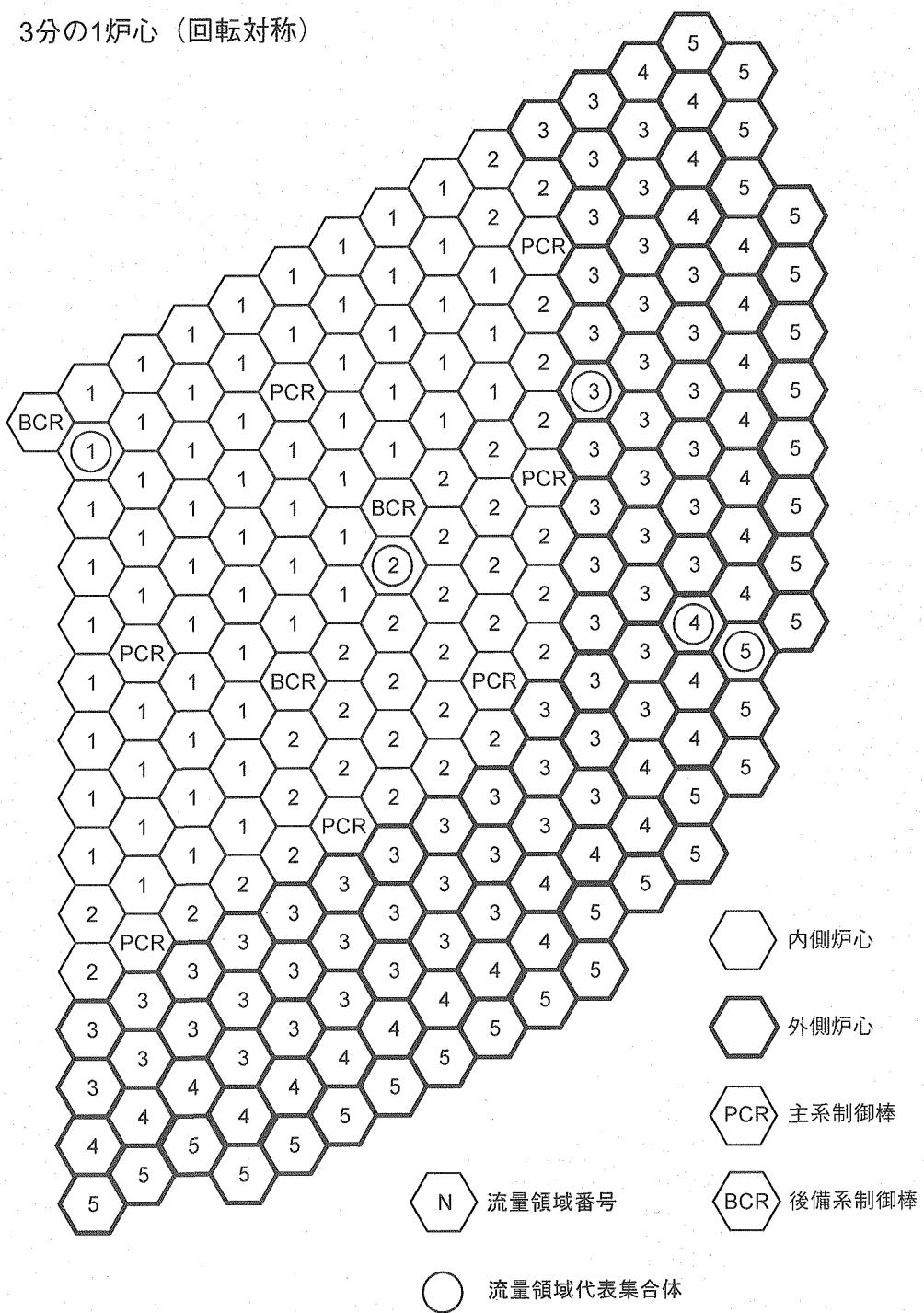


図 3-3 大型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分領域図（平衡期炉心）

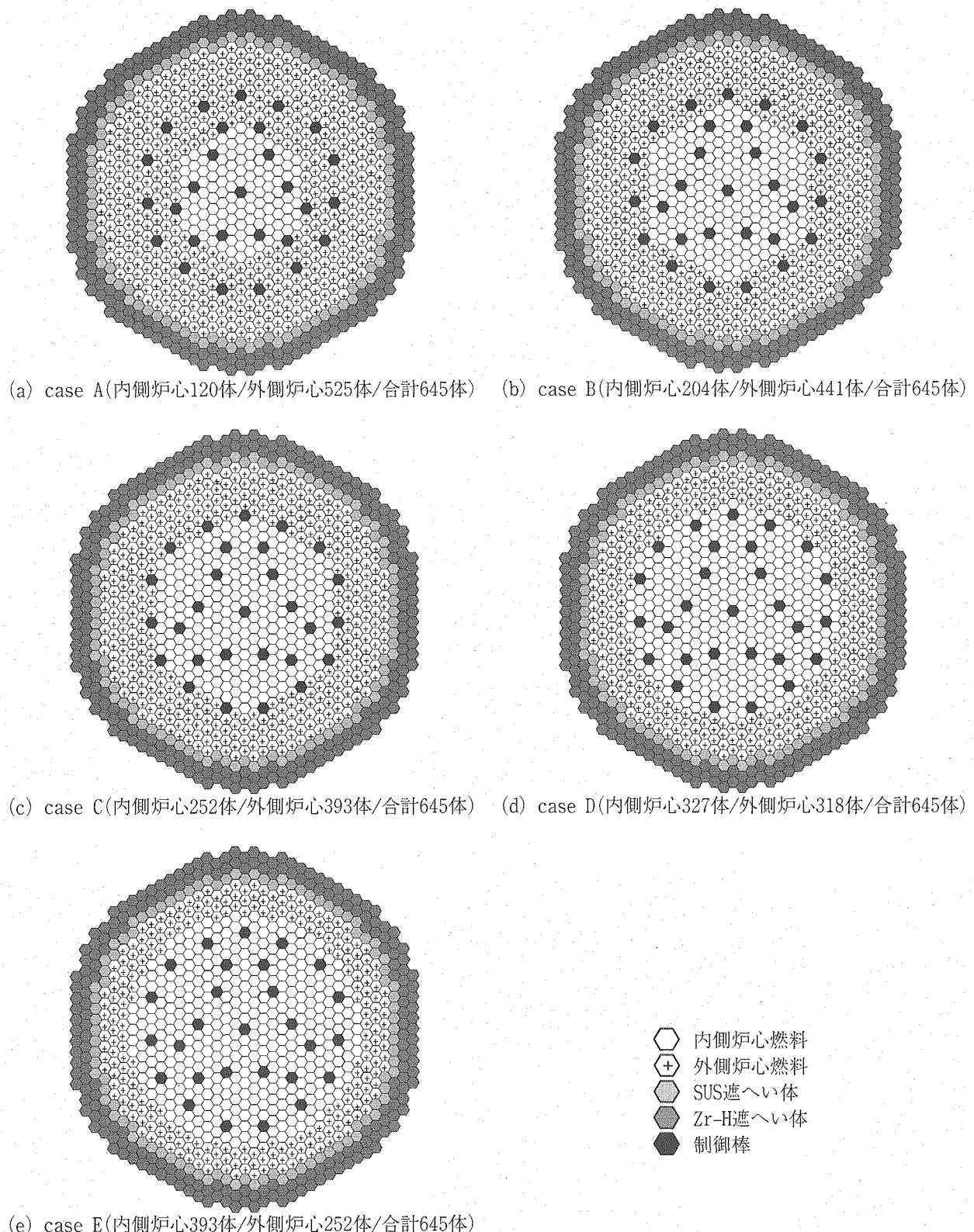
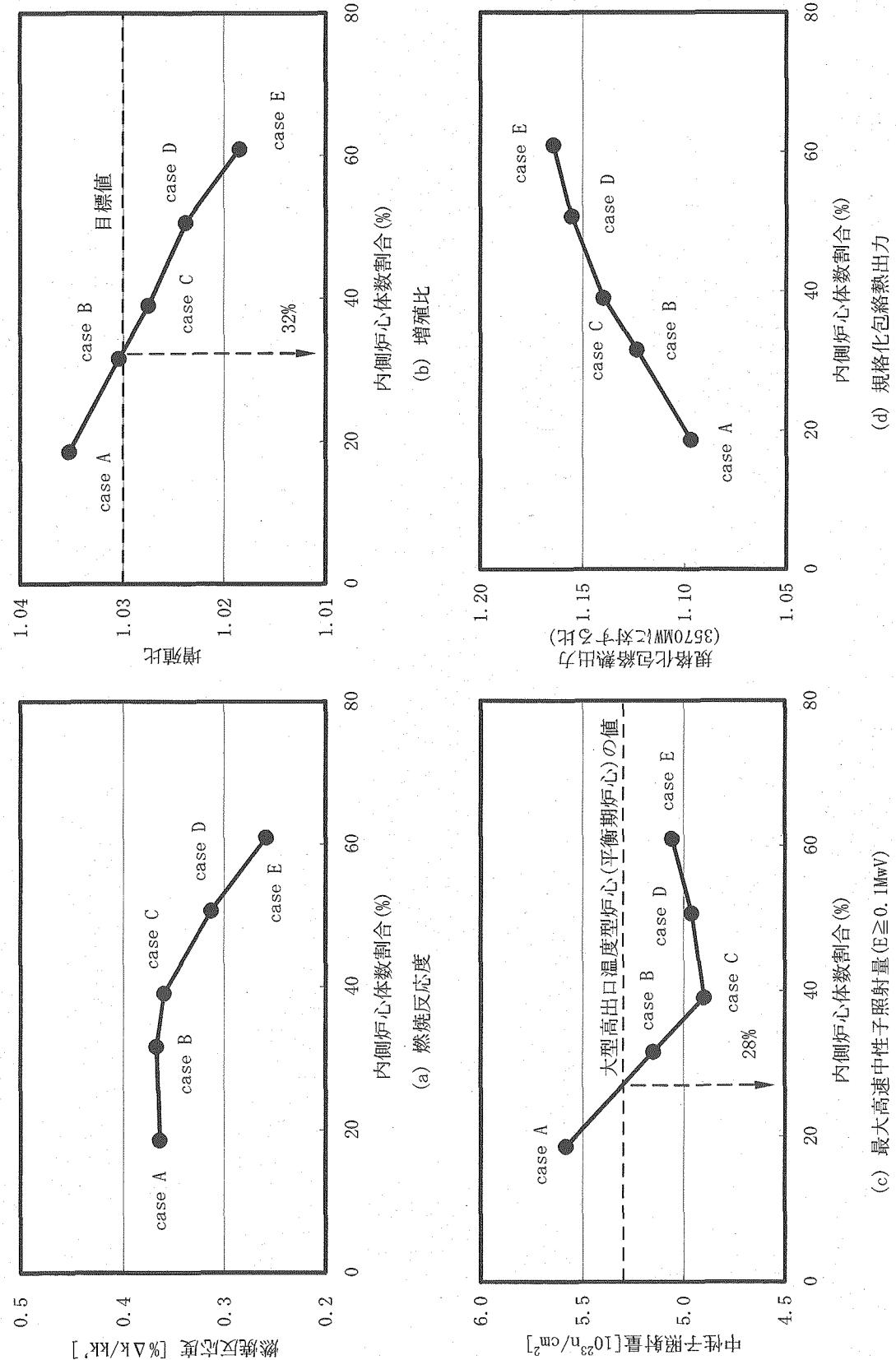


図 3-4 Pu 富化度 2 領域型炉心の境界サーベイ時の炉心配置



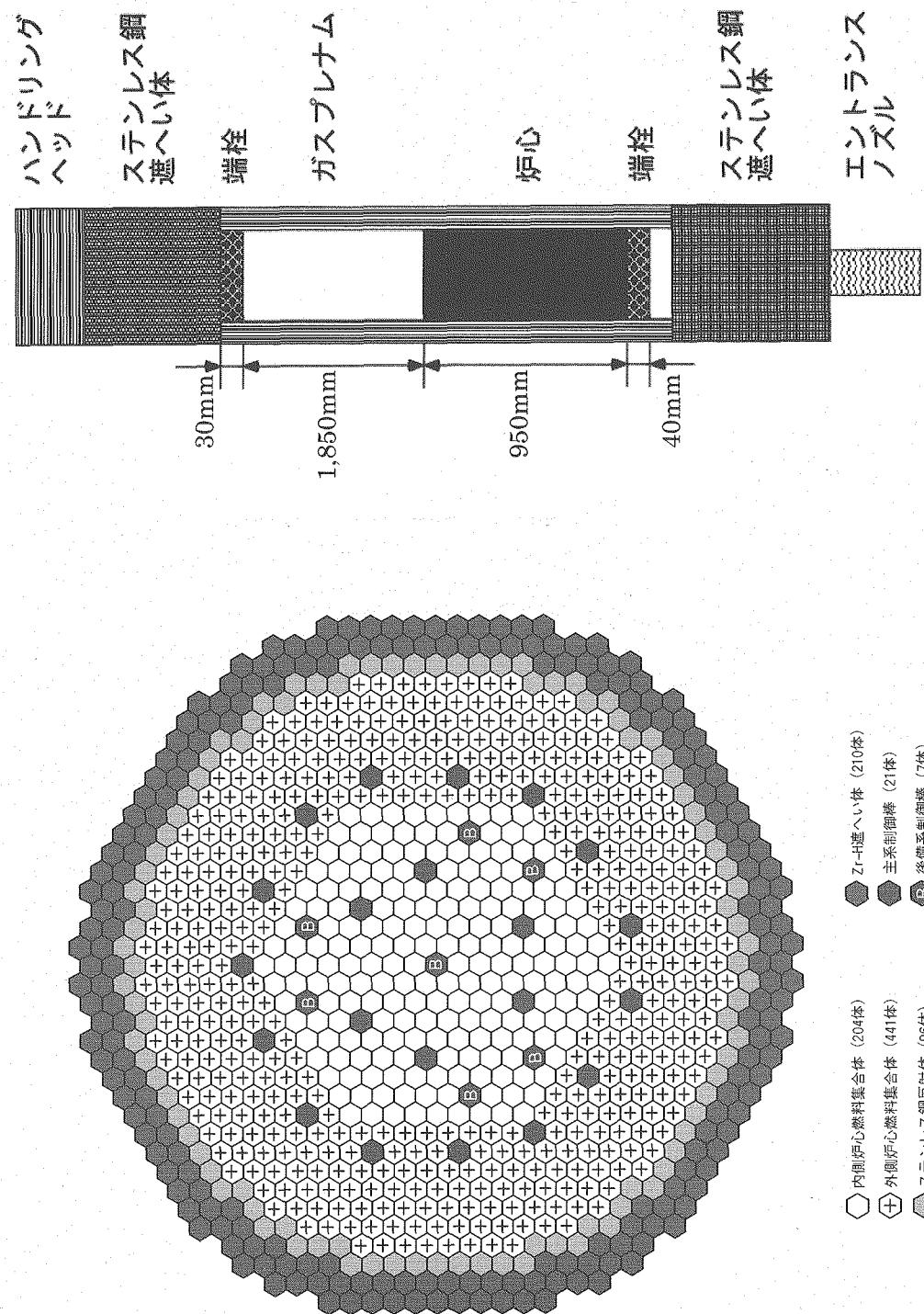
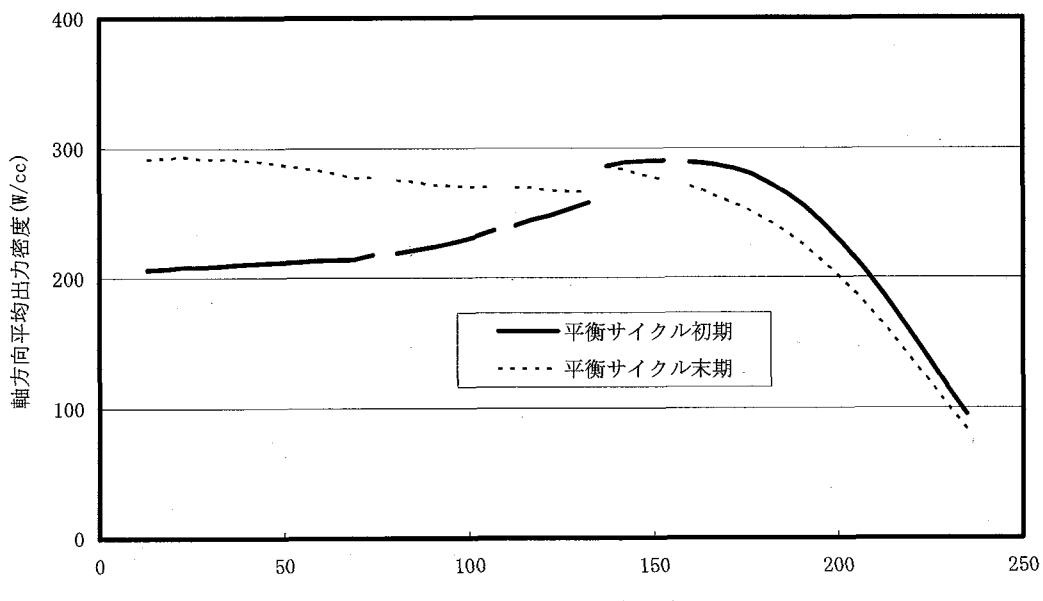
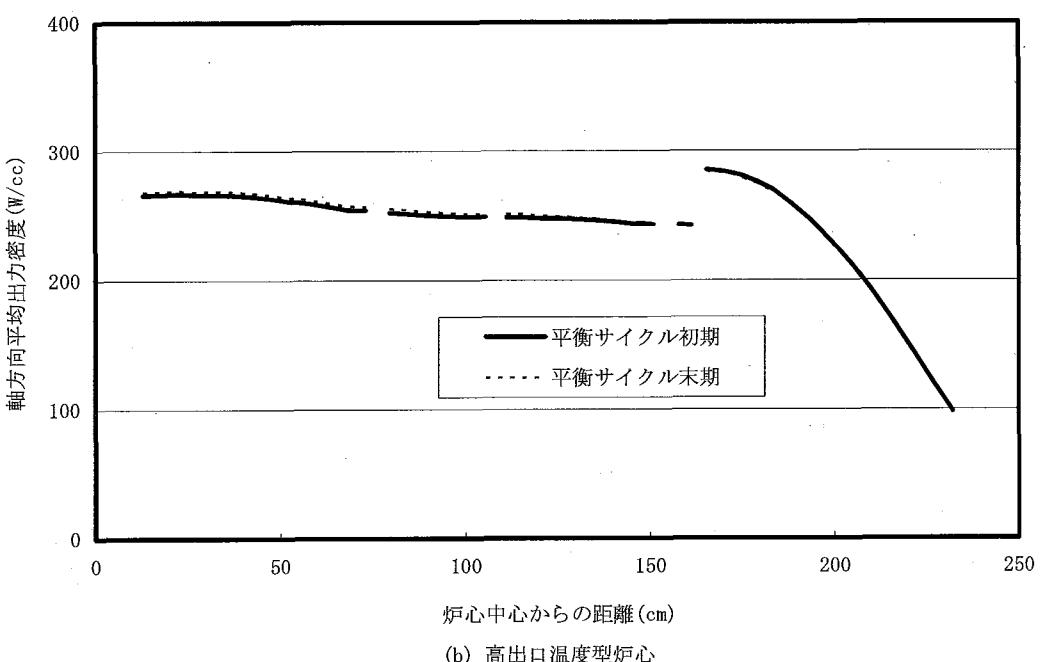


図 3-6 大型金属燃料 Pu 富化度 2 領域型炉心の炉心配置図（平衡期炉心）



(a) Pu富化度2領域型炉心



(b) 高出口温度型炉心

図 3-7 Pu 富化度 2 領域型炉心と高出口温度型炉心の径方向出力分布

## 4. 中型高出口温度型炉心の構築

### 4.1 代表炉心の選定

2004年度の中型高出口温度型炉心の仕様を基に、炉心のコンパクト化を追求した新遮へい体構成を有する電気出力 750 MW<sub>e</sub>の中型高出口温度型代表炉心の仕様を選定した。

新遮へい体構成は大型高出口温度型炉心と同様に、径方向はステンレス鋼反射体 1 層と Zr-H 遮へい体 2 層による構成とした。軸方向については、上部はガスプレナムとステンレス鋼遮へい体とし、下部はステンレス鋼遮へい体の増長あるいはステンレス鋼遮へい体と B<sub>4</sub>C 遮へい体の組み合わせにより構成するものとした (B<sub>4</sub>C 遮へい体が炉心特性に影響しないよう、ステンレス鋼遮へい体の厚さを 50 cm 程度以上とした)。これら新遮へい設計の成立性については、第 4.5 節において述べる。

中型高出口温度型炉心についても大型高出口温度型炉心と同様に、径方向遮へい体構成の変更により、内側炉心と外側炉心の燃料集合体数（境界）を調整する必要が生じた。取出平均燃焼度の減少を極力抑えつつ増殖比の目標値及び高速中性子照射量の制限値を満足するように調整した結果、2004年度炉心における内側炉心 159 体、外側炉心 234 体に代わり、内側炉心 144 体、外側炉心 249 体の構成を選定した。

その他、2004年度炉心からの変更点として、燃料寿命末期の被覆管周方向応力を抑制するために上部ガスプレナム長を 176 cm から 185 cm に増加した。

### 4.2 核特性

中型代表炉心（平衡期炉心）の炉心主要目と主要燃料仕様を表 4-1 及び表 4-2 に、主要核特性を表 4-3 に、物量収支を表 4-4～4-7 に、制御反応度収支を表 4-8 に、炉心配置を図 4-1 にそれぞれ示す。

主要核特性を見ると、運転サイクル長さ 23.3 ヶ月、増殖比 1.03、ナトリウムボイド反応度 7.2\$、炉心部取出平均燃焼度 93 GWd/t、最大高速中性子照射量  $5.4 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) 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。本炉心はブランケットを有しないため、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度は、炉心部取出平均燃焼度 93 GWd/t と等しくなる。したがって、本炉心は燃料サイクルコストに関して十分に高い経済性を有すると考えられる。

また、制御反応度収支は成立しており、かつ反応度停止余裕は適切であると考えられる。なお、余剰反応度の不確かさは MOX 燃料炉心を対象とした先行研究成果を基に設定しているが、大型高出口温度型炉心と同様に、燃料製作公差及び燃料交換余裕について合理化の可能性がある。

平衡期炉心に対し、上部軸方向ブランケットの付加 (13cm) により、増殖比 1.10 程度の導入期炉心を構築した。炉心主要目と主要燃料仕様を表 4-9 及び表 4-10 に、主要核特性を表 4-11 に、炉心配置を図 4-2 に、それぞれ示す。主要核特性について、運転サイクル長さ 23.3 ヶ月、増殖比 1.10、ナトリウムボイド反応度 7.6\$、炉心部取出平均燃焼度 92 GWd/t、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度 83 GWd/t、最大高速中性子照射量  $5.5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) 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 73 年となつた。

#### 4.3 热流力特性

平衡期炉心を対象に、原子炉出入口温度が 550/395 °C の条件の下、被覆管内面最高温度制限 650 °C を満足するよう流量領域区分及び流量配分を設定し、熱流力特性を評価した。2004 年度の炉心では流量領域数を 10 領域としていたが、合理化した工学的安全係数の適用により、流量領域数を削減でき、内側炉心 1 領域、外側炉心 7 領域の計 8 領域とすることが可能となった。流量配分結果を表 4-12 に、流量領域区分を図 4-3 にそれぞれ示す。被覆管内面最高温度は 649 °C となり、制限の 650 °C を満足している。バンドル部圧力損失は最大で 0.22 MPa であり、制限の 0.2 MPa 程度以下を満足している。

なお、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 4-13、表 4-14 のとおり求めた。

#### 4.4 燃料健全性

前節の熱流力特性解析結果に基づき、平衡期炉心の燃料健全性に係る検討として、CDF、被覆管周方向応力、バンドル・ダクト間相互作用 (BDI)、ダクト・ダクト間相互作用 (DDI) を評価した。

表 4-15 に各流量領域の燃料要素の CDF 値及び被覆管周方向応力を示す。寿命末期において CDF は最大で 0.11 であり、十分な余裕をもって制限の 0.5 以下の条件を満足している。寿命末期における被覆管周方向応力は、内側炉心燃料要素では 113 MPa、外側炉心燃料要素では 118 MPa となり、いずれも制限目安 120 MPa を満足している。

表 4-16 に BDI 評価結果を示す。最大の BDI 量は内側炉心燃料で現れ、-0.4 dw となっている。これは、従来の実証炉設計で適用している制限条件 (3 dw 以下) を満足する。

表 4-17 に DDI 評価結果を示す。ラッパ管間ギャップは定格運転時(入口温度: 395 °C)の支持板熱膨張を考慮した場合は内側炉心が 0.93 mm、外側炉心が 1.19 mm であり、制限条件 (ラッパ管同士が接触しない) を満足している。また、支持板熱膨張の温度として燃料交換時(入口温度: 180 °C)を想定した場合でも、内側炉心が 0.28 mm、外側炉心が 0.54 mm のラッパ管間ギャップであり、制限条件を満足している。ここで、第 3 章の大型炉心に比べて DDI 量の余裕が少なくなるのは、流量配分の結果からバンドル部圧力損失が大きい(内側炉心の場合、大型炉心の 0.18 MPa に対し中型炉心は 0.21 MPa) ためにラッパ管内外圧差が大きくなり、ラッパ管のバルジング膨れ量が約 10% 大きくなるためである。

以上のように、燃料健全性に係る検討として CDF、被覆管周方向応力、BDI、DDI の評価を行った結果、いずれも制限条件を満足し、燃料健全性の成立を見通すことができた。

#### 4.5 遮へい設計成立性

中性子漏洩が大型炉心より多く且つ軸方向ブランケットを持たない中型平衡期炉心を対象として、2 次元輸送理論に基づく炉心周りの中性子束計算を行い、遮へい設計の成立性を評価した。

##### (1) 遮へい体構成

径方向の遮へい体構成は、ステンレス鋼反射体 1 層と中性子遮へい能力に優れる Zr-H 遮へい体 2 層とした。軸方向上部については、ガスプレナム (185 cm) とその上部にステンレス鋼遮へい体 (15 cm) を配置した。軸方向下部については、次の 2 種類の遮へい体構成を候補と

した：

- ・構成①「ステンレス鋼遮へい体（110 cm）」…ステンレス鋼のみで下部遮へい体を構成し、構造を簡素化したケース。燃料集合体全長 5.4 m 以下の制限を満足する。ステンレス鋼の体積比を 63.7%、構造材（PNC-FMS 鋼）の体積比を 9.3% と設定。ステンレス鋼の素材は、照射量制限と反射体性能を考慮して、PNC1520 鋼を採用した。
- ・構成②「ステンレス鋼遮へい体（50 cm）+ガスプレナム（5 cm）+B<sub>4</sub>C 遮へい体（45 cm）」…B<sub>4</sub>C 遮へい体を用いて下部遮へい体となるべく短くしたケース。B<sub>4</sub>C 遮へい体が炉心に隣接すると核特性への影響が生じるため、炉心と B<sub>4</sub>C 遮へい体の間にステンレス鋼遮へい体を配置。ステンレス鋼遮へい体は B<sub>4</sub>C 遮へい体と一緒に構造とし、PNC-FMS 鋼の鞘管に B<sub>4</sub>C とステンレス鋼の栓をつめる構造とした。ステンレス鋼の体積比を 52%、構造材（PNC-FMS 鋼）の体積比を 13% と設定。

## (2) 評価手法・条件

炉心周りの遮へい解析として累積高速中性子照射量（以下、nvt）を評価した。主な手法及び条件を以下に示す。

- ・対象炉心： 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期炉心）
- ・計算モデル： 2 次元輸送計算（RZ 体系）
- ・核データライブラリ： JENDL-3.2 に基づく遮へい計算用ライブラリ JSSTD<sup>[12]</sup>
- ・補正係数： JASPER 遮へい実験解析に基づく E/C 値<sup>[13]</sup>
- ・炉心状態： 定格出力、平衡末期（燃料が減損し中性子束レベルが最大となるため）
- ・nvt 評価位置： 炉心槽、上部炉心支持板、炉上部機構

## (3) 評価結果

予備解析の結果、軸方向下部の遮へい体構成①と②はほぼ同程度の遮へい性能を示し、構成①の方がやや nvt が大きくなることがわかった。そこで構成①に対して詳細度を高めた解析を実施した。高速中性子束（補正前）の等高線図を図 4-4 に、nvt 評価結果を制限値と併せて表 4-18 に示す。遮へい設計は上部炉心支持板が最も厳しいが、nvt は  $3.8 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  であり、制限条件 ( $5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  以下) を満足している。炉心槽及び炉上部機構の nvt は、それぞれ  $7.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 、 $3.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  であり、いずれも制限条件に対して余裕のあることが確認できる。

以上、金属燃料高出口温度型炉心の遮へい設計成立性を見通すことのできる結果が得られた。軸方向下部の遮へい体構成について、ステンレス鋼のみで構造を簡素化したケース、ならびにステンレス鋼と B<sub>4</sub>C の組み合わせによる短尺化ケースを提案したが、両ケースとも設計制限を満足しており、今後の燃料集合体設計においてどちらも選択可能である。

表 4・1 中型金属燃料高出口温度型炉心の主要目 (平衡期炉心)

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	熱出力	1,785 MWt
	電気出力	750 MWe
	炉心型式	MABLE 型均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	23.3 ヶ月 (709 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径フランケット)	3/一バッチ
	炉心高さ	100 cm
	軸フランケット厚さ (上部/下部)	—/— cm
	炉心等価直径	342 cm
	遮へい体外接円径	4.51 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	144 / 249 / 393 体
	径フランケット体数	0 体
	制御棒本数 (主系/後備炉停止系)	12 / 4 体
	径遮へい体数 (ステンレス鋼反射体) (ZrH 遮へい体)	78 体 (1 層) 174 体 (2 層)
炉心燃料仕様	燃料形態	U-TRU-Zr 合金
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	7.5 mm
	被覆管肉厚	0.44 mm
	燃料スミア密度 (内側/外側炉心・軸フランケット/径フランケット)	70 / 75 / — %TD
	ワイヤ径	1.21 mm
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D)	1.17
	集合体当たり燃料ピン本数	271 本
	ラッパ管外対面間距離	156.6 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
	集合体配列ピッチ	161.1 mm
炉心主要特性	Pu 富化度 <sup>*1</sup>	12.3 wt%
	Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%
	炉心部取出平均燃焼度	93.1 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	93.1 GWd/t
	燃焼反応度	0.52 % Δk/k'
	最大線出力 (内側/外側)	271 / 295 W/cm
	炉心平均出力密度	194 W/cm <sup>3</sup>
	最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.0×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
	最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	5.4×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>
	増殖比	1.032
	ドップラ係数 [Tdk/dT] <sup>*4</sup> (平衡末期)	-4.1×10 <sup>-3</sup>
	ナトリウムボイド反応度 <sup>*4</sup> (平衡末期)	7.2 \$ <sup>*5</sup>

\*1 : Pu/HM、\*2 : フランケット燃料を含む全体の取出平均燃焼度、\*3 : E > 0.1 MeV

\*4 : 非均質補正考慮、\*5 : 実効遅発中性子割合 0.00358

表 4-2 中型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（平衡期炉心）

項目	仕様		
	炉心	軸ブランケット	径ブランケット
燃料要素	燃料形態	U-TRU-Zr	—
	被覆管材料	ODS 鋼	—
	被覆管外径 (mm)	7.5	—
	被覆管内径 (mm)	6.62	—
	被覆管肉厚 (mm)	0.44	—
	燃料要素全長 (mm)	2,920	—
	燃料スタック長 (mm)	1,000	—
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,850	—
	ボンド材	ナトリウム	—
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	—
集合体	Zr含有率 (wt%)	6~10	—
	集合体全長 (mm)	4,695	—
	燃料ピン本数 (本)	271	—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.76	—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.17	—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼	—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	156.6	—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	146.6	—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5	—
	集合体配列ピッチ (mm)	161.1	—
	ワイヤ径 (mm)	1.21	—
体積比 (%)	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0	—
	燃料 (実効)	41.5 (29.1~31.1)	—
	構造材	24.9	—
	冷却材	33.6	—

表 4-3 中型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（平衡期炉心）

項目	設計値
運転サイクル長さ	23.3 ヶ月 (709 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径ブランケット)	3 / 一 バッチ
Pu 富化度 <sup>*1</sup>	12.3 wt%
Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %TD
取出平均燃焼度 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	93.1 / — / — GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	93.1 GWd/t
燃焼反応度	0.52 % Δk/kk'
増殖比 (全体) (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.032 1.032 / — / —
最大線出力 (内側/外側)	271 / 295 W/cm
炉心平均出力密度	194 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.000 / — / —
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.0×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	5.4×10 <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/軸ブランケット/径ブランケット)	13.6 / — / — t
ブランケット/炉心重金属重量比	0
初装荷核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	4.7 t/GWe
原子炉倍増時間	—
複合システム倍増時間 <sup>*4</sup>	—
ナトリウムボイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.2 \$ <sup>*6</sup>
ドップラ係数[Tdk/dT] <sup>*5</sup> (平衡末期)	-4.1×10 <sup>-3</sup>

<sup>\*1</sup> : Pu/HM<sup>\*2</sup> : ブランケット燃料を含む全体の取出平均燃焼度<sup>\*3</sup> : E > 0.1 MeV<sup>\*4</sup> : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日<sup>\*5</sup> : 非均質補正考慮<sup>\*6</sup> : 実効遅発中性子割合 0.00358

表 4-4 中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心）  
—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	11.6	24.0	35.6	0.0	0.0	0.0	35.6
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	3,855.4	7,977.0	11,832.3	0.0	0.0	0.0	11,832.3
U合計	3,867.0	8,001.0	11,867.9	0.0	0.0	0.0	11,867.9
Np-237	2.2	4.7	6.9	0.0	0.0	0.0	6.9
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	2.2	4.7	6.9	0.0	0.0	0.0	6.9
Pu-238	6.2	12.8	19.0	0.0	0.0	0.0	19.0
Pu-239	370.9	767.5	1,138.5	0.0	0.0	0.0	1,138.5
Pu-240	141.6	293.1	434.7	0.0	0.0	0.0	434.7
Pu-241	13.5	27.9	41.4	0.0	0.0	0.0	41.4
Pu-242	13.5	27.9	41.4	0.0	0.0	0.0	41.4
Pu合計	545.7	1,129.2	1,674.9	0.0	0.0	0.0	1,674.9
Am-241	9.0	18.6	27.6	0.0	0.0	0.0	27.6
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	2.8	5.8	8.6	0.0	0.0	0.0	8.6
Am合計	11.8	24.4	36.2	0.0	0.0	0.0	36.2
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	2.2	4.7	6.9	0.0	0.0	0.0	6.9
Cm-245	0.6	1.2	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
Cm合計	2.8	5.8	8.6	0.0	0.0	0.0	8.6
合計	4,429.6	9,165.0	13,594.6	0.0	0.0	0.0	13,594.6
FP <sup>*1</sup>	13.0	24.1	37.2	0.0	0.0	0.0	37.2
FP <sup>*2</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	13.0	24.1	37.2	0.0	0.0	0.0	37.2

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 4-5 中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心）  
—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	3.1	11.1	14.2	0.0	0.0	0.0	14.2
U-236	1.5	2.4	3.9	0.0	0.0	0.0	3.9
U-238	3,257.3	7,213.1	10,470.3	0.0	0.0	0.0	10,470.3
U合計	3,261.9	7,226.6	10,488.5	0.0	0.0	0.0	10,488.5
Np-237	2.7	5.6	8.4	0.0	0.0	0.0	8.4
Np-239	0.8	1.0	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
Np合計	3.5	6.6	10.1	0.0	0.0	0.0	10.1
Pu-238	6.3	13.3	19.7	0.0	0.0	0.0	19.7
Pu-239	379.7	782.6	1,162.3	0.0	0.0	0.0	1,162.3
Pu-240	157.2	307.3	464.5	0.0	0.0	0.0	464.5
Pu-241	20.8	35.4	56.2	0.0	0.0	0.0	56.2
Pu-242	12.8	26.2	39.0	0.0	0.0	0.0	39.0
Pu合計	576.8	1,164.9	1,741.7	0.0	0.0	0.0	1,741.7
Am-241	6.4	16.9	23.3	0.0	0.0	0.0	23.3
Am-242m	0.5	1.0	1.5	0.0	0.0	0.0	1.5
Am-243	3.3	6.4	9.7	0.0	0.0	0.0	9.7
Am合計	10.2	24.3	34.5	0.0	0.0	0.0	34.5
Cm-242	0.5	0.7	1.2	0.0	0.0	0.0	1.2
Cm-243	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Cm-244	3.1	5.6	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7
Cm-245	0.6	1.1	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
Cm合計	4.2	7.5	11.7	0.0	0.0	0.0	11.7
合計	3,856.5	8,429.9	12,286.5	0.0	0.0	0.0	12,286.5
FP <sup>*1</sup>	13.0	24.1	37.2	0.0	0.0	0.0	37.2
FP <sup>*2</sup>	573.0	735.1	1,308.1	0.0	0.0	0.0	1,308.1
FP合計	586.1	759.3	1,345.3	0.0	0.0	0.0	1,345.3

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 4-6 中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心）  
－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	23.8	56.6	80.4	0.0	0.0	0.0	80.4
U-236	2.1	3.0	5.2	0.0	0.0	0.0	5.2
U-238	10,944.9	23,147.7	34,092.6	0.0	0.0	0.0	34,092.6
U合計	10,970.8	23,207.3	34,178.2	0.0	0.0	0.0	34,178.2
Np-237	7.4	15.1	22.5	0.0	0.0	0.0	22.5
Np-239	1.6	2.1	3.7	0.0	0.0	0.0	3.7
Np合計	9.0	17.2	26.2	0.0	0.0	0.0	26.2
Pu-238	18.5	38.4	56.9	0.0	0.0	0.0	56.9
Pu-239	1,142.2	2,334.9	3,477.2	0.0	0.0	0.0	3,477.2
Pu-240	441.9	894.1	1,336.1	0.0	0.0	0.0	1,336.1
Pu-241	49.9	93.0	142.9	0.0	0.0	0.0	142.9
Pu-242	39.3	81.7	121.0	0.0	0.0	0.0	121.0
Pu合計	1,691.9	3,442.2	5,134.1	0.0	0.0	0.0	5,134.1
Am-241	23.3	53.4	76.7	0.0	0.0	0.0	76.7
Am-242m	0.8	1.3	2.1	0.0	0.0	0.0	2.1
Am-243	9.0	18.1	27.1	0.0	0.0	0.0	27.1
Am合計	33.1	72.8	105.9	0.0	0.0	0.0	105.9
Cm-242	1.1	1.5	2.6	0.0	0.0	0.0	2.6
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm-244	7.6	15.0	22.6	0.0	0.0	0.0	22.6
Cm-245	1.6	3.4	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0
Cm合計	10.4	19.9	30.3	0.0	0.0	0.0	30.3
合計	12,715.3	26,759.4	39,474.6	0.0	0.0	0.0	39,474.6
FP <sup>*1</sup>	39.1	72.4	111.5	0.0	0.0	0.0	111.5
FP <sup>*2</sup>	573.4	735.8	1,309.2	0.0	0.0	0.0	1,309.2
FP合計	612.5	808.2	1,420.7	0.0	0.0	0.0	1,420.7

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 4-7 中型金属燃料高出口温度型炉心物量収支（平衡期炉心）  
－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	15.3	43.7	59.0	0.0	0.0	0.0	59.0
U-236	3.6	5.5	9.1	0.0	0.0	0.0	9.1
U-238	10,346.8	22,383.8	32,730.6	0.0	0.0	0.0	32,730.6
U合計	10,365.8	22,432.9	32,798.7	0.0	0.0	0.0	32,798.7
Np-237	7.8	16.1	24.0	0.0	0.0	0.0	24.0
Np-239	2.4	3.0	5.4	0.0	0.0	0.0	5.4
Np合計	10.2	19.2	29.4	0.0	0.0	0.0	29.4
Pu-238	18.6	39.0	57.6	0.0	0.0	0.0	57.6
Pu-239	1,151.0	2,350.0	3,501.0	0.0	0.0	0.0	3,501.0
Pu-240	457.5	908.4	1,365.9	0.0	0.0	0.0	1,365.9
Pu-241	57.2	100.6	157.8	0.0	0.0	0.0	157.8
Pu-242	38.7	80.0	118.6	0.0	0.0	0.0	118.6
Pu合計	1,723.0	3,477.9	5,200.9	0.0	0.0	0.0	5,200.9
Am-241	20.8	51.7	72.4	0.0	0.0	0.0	72.4
Am-242m	1.3	2.3	3.6	0.0	0.0	0.0	3.6
Am-243	9.4	18.7	28.1	0.0	0.0	0.0	28.1
Am合計	31.5	72.7	104.2	0.0	0.0	0.0	104.2
Cm-242	1.5	2.2	3.7	0.0	0.0	0.0	3.7
Cm-243	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	8.5	15.9	24.4	0.0	0.0	0.0	24.4
Cm-245	1.7	3.3	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0
Cm合計	11.8	21.6	33.4	0.0	0.0	0.0	33.4
合計	12,142.2	26,024.3	38,166.5	0.0	0.0	0.0	38,166.5
FP <sup>*1</sup>	39.1	72.4	111.5	0.0	0.0	0.0	111.5
FP <sup>*2</sup>	1,146.5	1,470.9	2,617.3	0.0	0.0	0.0	2,617.3
FP合計	1,185.6	1,543.3	2,728.9	0.0	0.0	0.0	2,728.9

※単位:kg \*1: 再処理時随伴FP \*2: 燃焼期間中生成FP

表 4-8 中型金属燃料高出口温度型炉心の制御反応度収支（平衡期炉心）

項目	主系		後備系
	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	1.88	0.35	0.49
a)出力補償	0.49	0.35	0.49
b)燃焼補償	0.82		
c)運転余裕	0.20		
d)燃料スエリング補償	0.37		
2.余剰反応度の不確かさ( $2\sigma$ )	0.51	0.07	0.10
a)臨界性予測誤差	0.00		
b)出力補償予測誤差		0.07	0.10
c)燃料製作公差	0.46		
d)燃料交換余裕	0.20		
3.事故時投入反応度		0.18	0.18
必要制御反応度	2.79 *	0.60	0.77
補正後制御棒価値	4.01	0.90	1.38
反応度停止余裕	1.22	0.30	0.61

単位: % $\Delta k/kk'$ \*: 炉停止余裕 1 \$ (0.4% $\Delta k/kk'$ )を考慮

表 4-9 中型金属燃料高出口温度型炉心の主要目（導入期炉心）

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	熱出力	1,785 MWt
	電気出力	750 MWe
	炉心型式	MABLE 型均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	23.3 ヶ月 (709 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/軸フランケット)	3/一バッチ
	炉心高さ	100 cm
	軸フランケット厚さ (上部/下部)	13/- cm
	炉心等価直径	342 cm
	遮へい体外接円径	4.51 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	144 / 249 / 393 体
炉心燃料仕様	径フランケット体数	0 体
	制御棒本数 (主系/後備炉停止系)	12 / 4 体
	径遮へい体数 (ステンレス鋼反射体) (ZrH 遮へい体)	78 体 (1 層) 174 体 (2 層)
	燃料形態	U-TRU-Zr 合金
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	7.5 mm
	被覆管肉厚	0.44 mm
	燃料スミア密度 (内側/外側炉心・軸フランケット/径フランケット)	70 / 75 / - %TD
	ワイヤ径	1.21 mm
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D)	1.17
炉心主要特性	集合体当たり燃料ピン本数	271 本
	ラッパ管外対面間距離	156.6 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
	集合体配列ピッチ	161.1 mm
	Pu 富化度 <sup>*1</sup>	12.0 wt%
	Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%
	炉心部取出平均燃焼度	91.6 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	83.0 GWd/t
	燃焼反応度	0.22 % Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側)	262 / 268 W/cm

\*1 : Pu/HM、\*2 : フランケット燃料を含む全体の取出平均燃焼度、\*3 : E > 0.1 MeV

\*4 : 非均質補正考慮、\*5 : 実効遅発中性子割合 0.00358

表 4-10 中型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様（導入期炉心）

項目	仕様			
	炉心	軸フランケット	径フランケット	
燃料要素	燃料形態	U-TRU-Zr	U-Zr	
	被覆管材料	ODS 鋼		
	被覆管外径 (mm)	7.5		
	被覆管内径 (mm)	6.62		
	被覆管肉厚 (mm)	0.44		
	燃料要素全長 (mm)	3,050		
	燃料スタック長 (mm)	1,000	130 / — (上部/下部)	
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,850		
	ボンド材	ナトリウム		
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	←	
集合体	Zr含有率 (wt%)	6~10	10	
	集合体全長 (mm)	4,825		
	燃料ピン本数 (本)	271		
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.76		
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.17		
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	156.6		
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	146.6		
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		
	集合体配列ピッチ (mm)	161.1		
	ワイヤ径 (mm)	1.21		
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0		
体積比 (%)	燃料 (実効)	41.5 (29.1~31.1)	←	—
	構造材	24.9	←	—
	冷却材	33.6	←	—

表 4-11 中型金属燃料高出口温度型炉心の主要核特性（導入期炉心）

項目	設計値
運転サイクル長さ	23.3 ヶ月 (709 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径ブランケット)	3 / 一 バッチ
Pu 富化度 <sup>*1</sup>	12.0 wt%
Zr 含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %TD
取出平均燃焼度 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	91.6 / 12.5 / — GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>*2</sup>	83.0 GWd/t
燃焼反応度	0.22 % Δk/kk'
増殖比 (全体) (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	1.102 1.036 / 0.066 / —
最大線出力 (内側/外側)	262 / 268 W/cm
炉心平均出力密度	194 W/cm <sup>3</sup>
出力分担率 (炉心/軸ブランケット/径ブランケット)	0.984 / 0.017 / —
最大高速中性子束 <sup>*3</sup>	3.0×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> s
最大高速中性子照射量 <sup>*3</sup>	5.5×10 <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/軸ブランケット/径ブランケット)	13.6 / 1.7 / — t
ブランケット/炉心重金属重量比	約 0.1
初装荷核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	4.6 t/GWe
原子炉倍増時間	55 年
複合システム倍増時間 <sup>*4</sup>	73 年
ナトリウムボイド反応度 <sup>*5</sup> (平衡末期)	7.6 \$ <sup>*6</sup>
ドップラ係数[Tdk/dT] <sup>*5</sup> (平衡末期)	-4.1×10 <sup>-3</sup>

<sup>\*1</sup> : Pu/HM<sup>\*2</sup> : ブランケット燃料を含む全体の取出平均燃焼度<sup>\*3</sup> : E > 0.1 MeV<sup>\*4</sup> : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日<sup>\*5</sup> : 非均質補正考慮<sup>\*6</sup> : 実効遅発中性子割合 0.00358

表 4-12 中型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分結果（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	集合体数	集合体最大出力		必要領域流量 [kg/s]	冷却材最高温度 [°C]	被覆管内面最高温度*2 [°C]	バンドル部圧力損失 [MPa]
			[MW]	[kg/s]				
内側炉心	1	144	6.04	25.9	3729.6	635	648	0.21
	2	39	6.26	27.2	1060.8	635	649	0.22
	3	48	5.61	24.9	1195.2	635	649	0.19
	4	36	4.70	21.4	770.4	638	649	0.15
外側炉心	5	30	4.26	19.5	585.0	638	649	0.12
	6	42	3.48	16.7	701.4	639	648	0.09
	7	24	2.75	13.6	326.4	641	649	0.06
	8	30	2.23	11.6	348.0	642	649	0.05
合計(最大値)	—	393	(6.26)	(27.2)	8716.8	(642)	(649)	(0.22)
			炉心流量*1 [kg/s]		8719.7			
			余剰流量 [kg/s]		+2.9 (+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: 1.16~1.17、周辺流れ効果係数計算結果: 1.114~1.115

表 4-13 中型金属燃料高出口温度型炉心における領域内最大出力燃料要素の出力履歴（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	燃料ビン最大出力 [kW]				寿命中平均出力 [kW]
		装荷第1サイクル BOC	EOC	装荷第2サイクル BOC	EOC	
内側炉心	1	20.2	22.5	20.6	21.9	20.4
	2	23.5	22.8	23.8	22.7	23.5
	3	21.0	21.7	21.3	21.7	21.1
	4	19.2	19.4	19.2	19.2	19.0
外側炉心	5	17.2	17.5	17.3	17.4	17.3
	6	15.1	14.2	15.1	14.3	15.1
	7	12.7	12.5	12.8	12.4	12.8
	8	10.7	10.1	10.8	10.1	10.8

表 4-14 中型金属燃料高出口温度型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（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	被覆管肉厚中心ホットスポット温度 [°C]					
		装荷第1サイクル		装荷第2サイクル		装荷第3サイクル	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
内側炉心	1	619	644	624	638	621	635
	2	641	635	645	633	642	628
	3	635	642	638	643	637	639
	4	642	645	642	642	640	639
	5	642	645	643	645	642	642
	6	644	630	645	631	645	629
	7	646	642	646	640	647	641
	8	645	631	647	631	647	630

表 4-15 中型金属燃料高出口温度型炉心における寿命末期 CDF 値および被覆管周方向応力（平衡期炉心）

炉心領域	流量領域	被覆管肉厚中心ホットスポット温度 [°C]		燃料ピッチ [MWd/t]	被覆管周方向応力 [MPa]	CDF
		最高	寿命末期			
内側炉心	1	644	635	136,400	113	0.068
	2	645	628	124,100	118	0.110
	3	643	639	114,800	109	0.071
	4	645	639	102,900	97	0.024
	5	645	642	93,200	87	0.009
	6	645	629	78,700	69	0.0003
	7	647	641	67,900	60	0.0002
	8	647	630	56,000	47	0.000006

表 4-16 中型金属燃料高出口温度型炉心における BDI 量（平衡期炉心）

項目		内側炉心	外側炉心
BDI量 (mm) /ミナル温度条件	平均 * <sup>1</sup>	-0.71 ( -0.6 dw )	-0.80 ( -0.7 dw )
	最大 * <sup>2</sup>	-0.47 ( -0.4 dw )	-0.58 ( -0.5 dw )
	不確かさを考慮した 高温側温度条件	-0.74 ( -0.6 dw )	-0.83 ( -0.7 dw )
	最大 * <sup>2</sup>	-0.52 ( -0.4 dw )	-0.62 ( -0.5 dw )
不確かさを考慮した 低温側温度条件	平均 * <sup>1</sup>	-0.67 ( -0.6 dw )	-0.76 ( -0.6 dw )
	最大 * <sup>2</sup>	-0.43 ( -0.4 dw )	-0.54 ( -0.4 dw )

\*<sup>1</sup> ラッパ管平均内対面幅\*<sup>2</sup> ラッパ管最小内対面幅

表 4-17 中型金属燃料高出口温度型炉心における DDI 量（平衡期炉心）

項目		内側炉心	外側炉心
ラッパ管間 ギャップ (mm)	20°C(常温) → 395°C(通常 運転時)の支持板熱膨張	0.93	1.19
	20°C(常温) → 180°C(燃料 交換時)の支持板熱膨張	0.28	0.54
	支持板膨張未考慮(参考)	(-0.14)	(0.12)

表 4-18 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期炉心）の累積高速中性子照射量（nvt）  
— 軸方向下部遮へい体をステンレス鋼のみ（110 cm）とした場合 —

評価点	高速中性子束 <sup>*1</sup> [n/cm <sup>2</sup> s]	運転期間 [年]	稼働率 (%)	nvt 計算ノミナル値 [n/cm <sup>2</sup> ]	補正 係数 <sup>*2</sup>	nvt 設計値 [n/cm <sup>2</sup> ]	制限値 [n/cm <sup>2</sup> ]
炉心槽	$2.0 \times 10^{10}$	60	93	$3.6 \times 10^{19}$	2.2	$7.8 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{21}$
上部炉心支持板	$5.1 \times 10^{11}$			$9.0 \times 10^{20}$	4.2	$3.8 \times 10^{21}$	$5 \times 10^{21}$
炉上部機構	$4.7 \times 10^{10}$			$8.2 \times 10^{19}$	3.8	$3.1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{21}$

\*1 : E > 0.1 MeV

\*2 : JASPER 実験解析結果に基づく

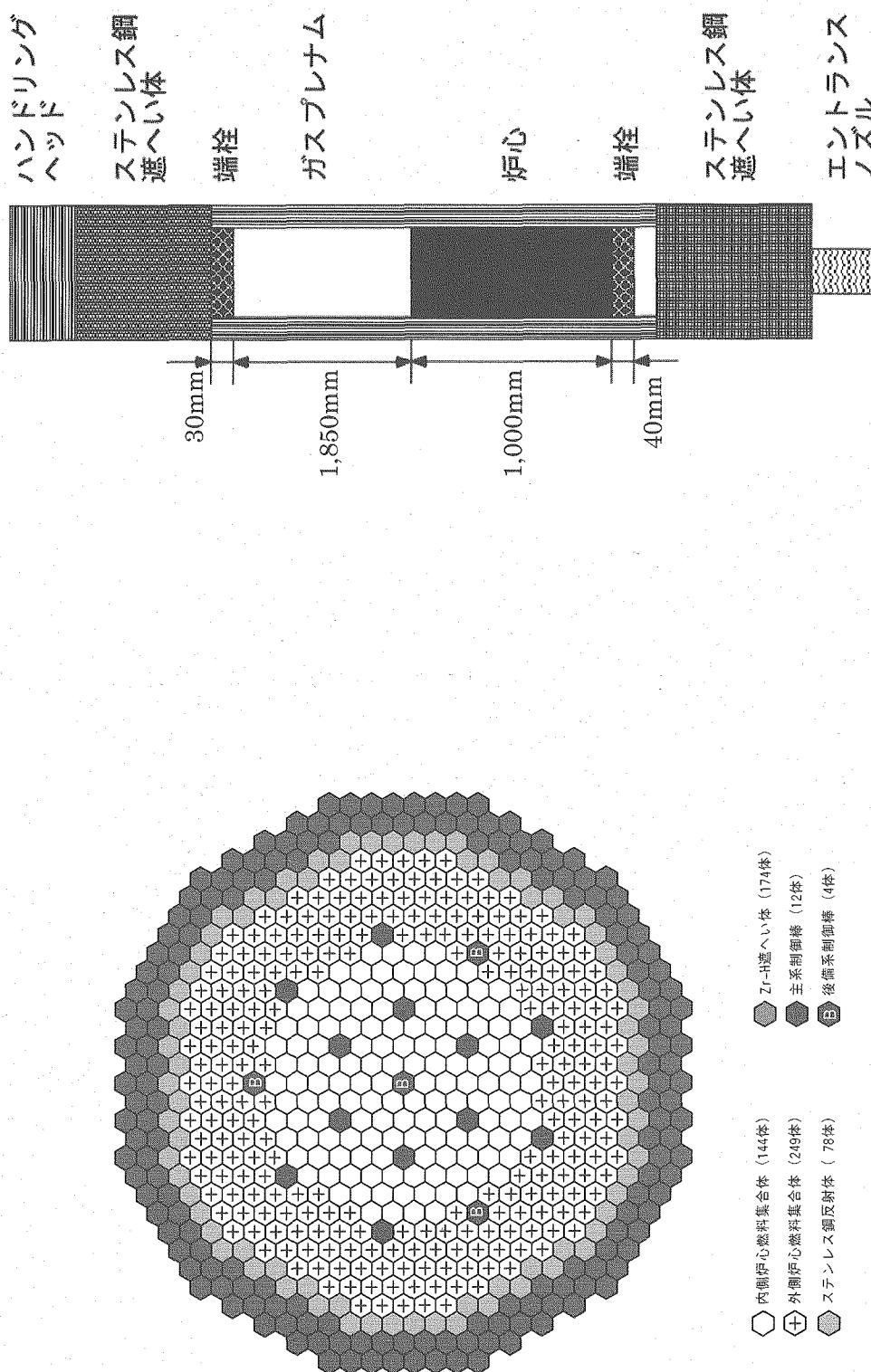
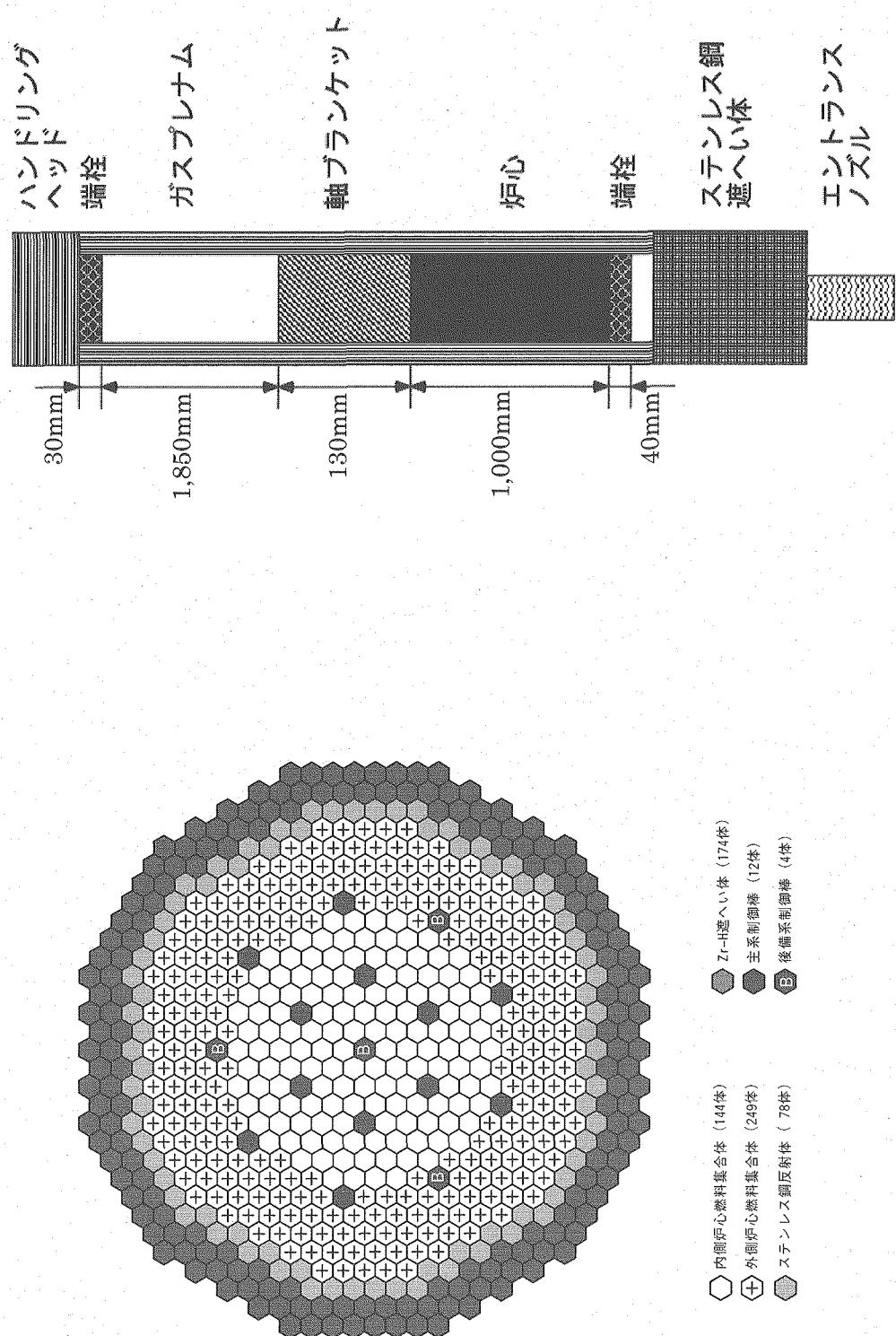


図 4-1 中型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図（平衡期炉心）



3分の1炉心（回転対称）

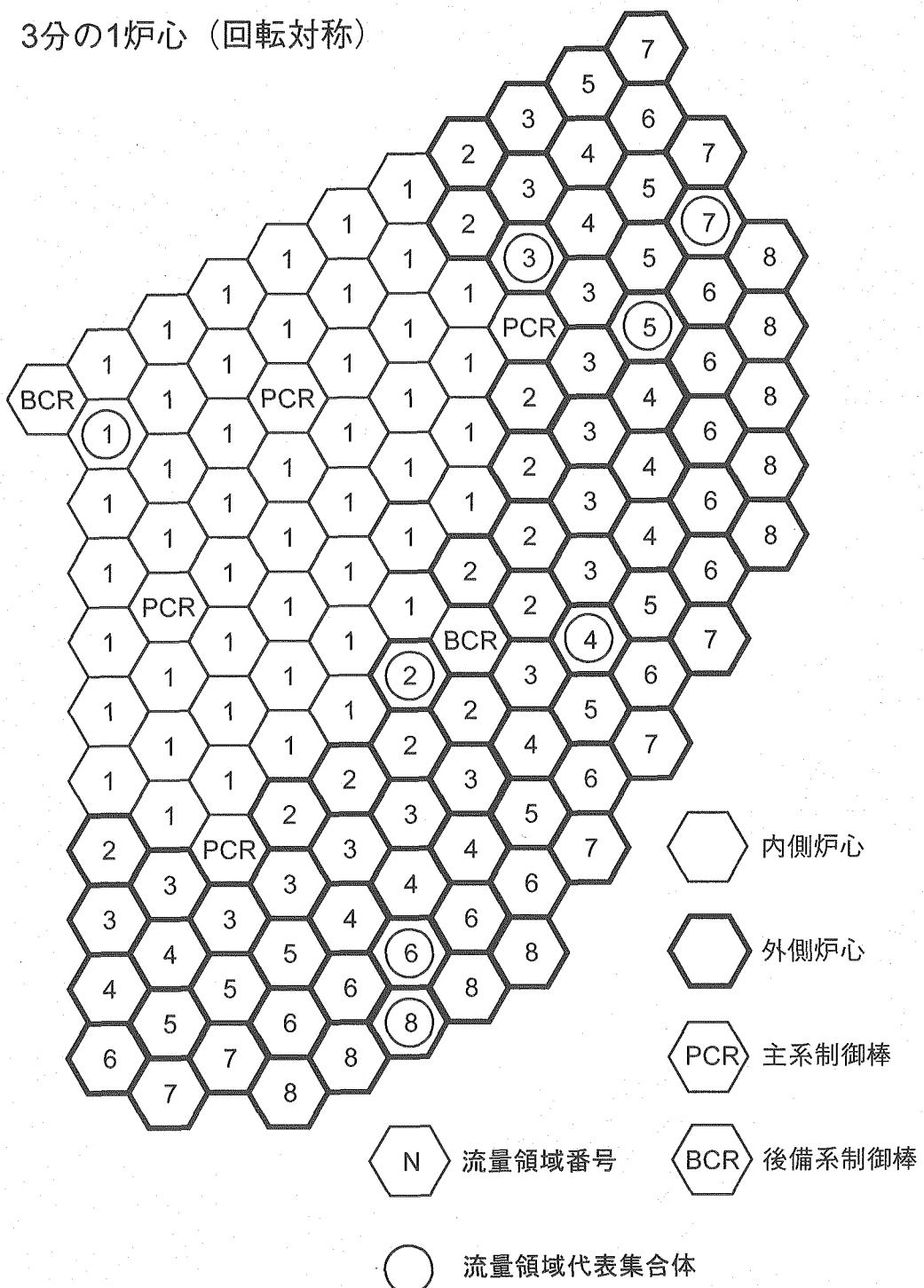


図 4-3 中型金属燃料高出口温度型炉心の流量配分領域図（平衡期炉心）

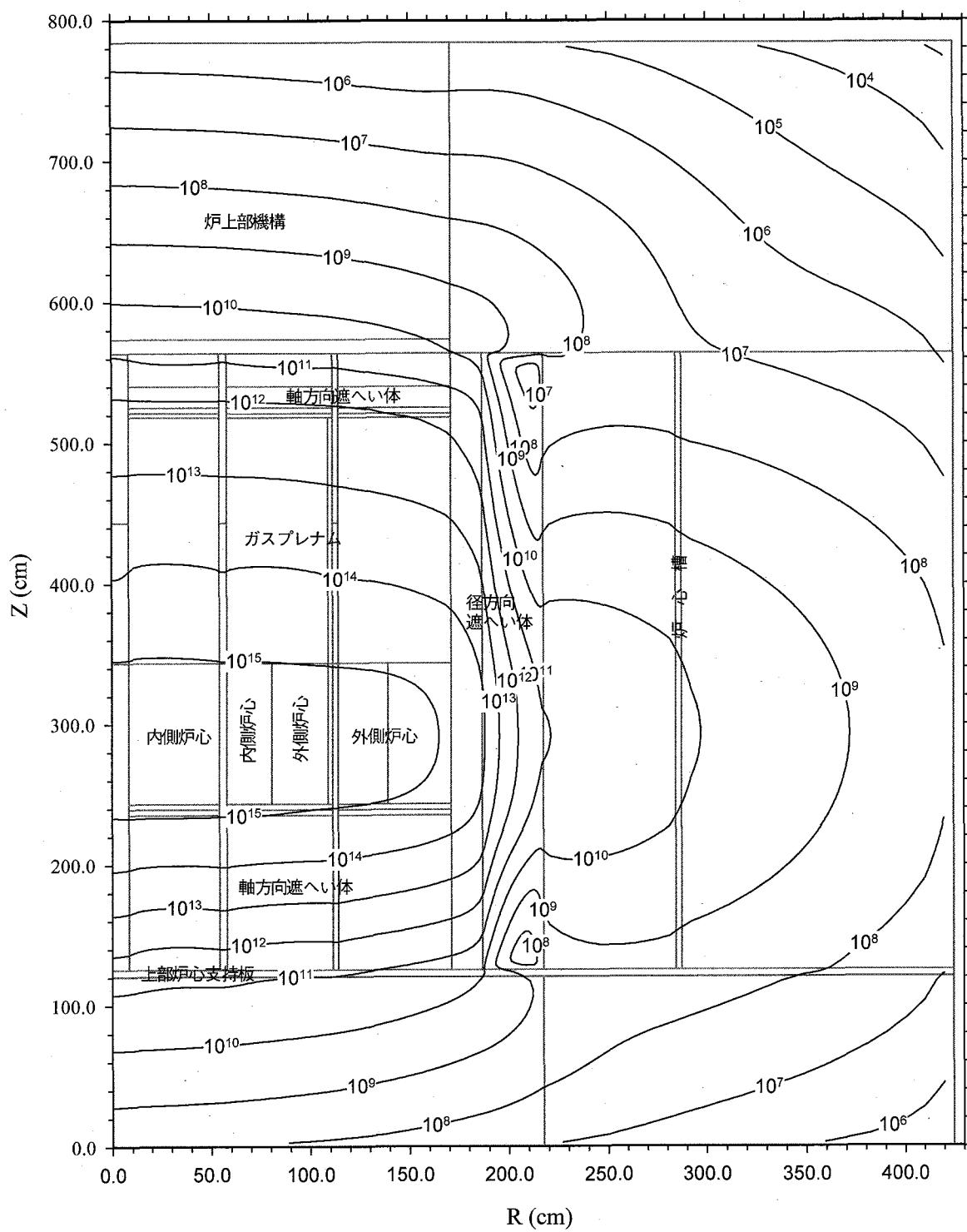


図 4-4 中型金属燃料高出口温度型炉心の高速中性子束等高線図（平衡期炉心）  
— 軸方向下部遮へい体をステンレス鋼のみ（110 cm）とした場合 —

## 5. 柔軟性評価

大型金属燃料高出口温度型炉心（導入期炉心）を対象に、様々な軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合の核的な柔軟性の評価を行った。また、増殖比 1.2～1.3 の高増殖炉心の検討を核的な観点から行った。

### 5.1 TRU 組成変動の影響

表 5-1 に第 3 章で設定した大型金属燃料高出口温度型炉心（導入期炉心）に MOX 燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合、さらに 4 種類の軽水炉使用済燃料回収 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。金属燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合に対して、MOX 燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合の炉心特性への影響は小さいが、約 3% の内部転換比の向上により倍増時間に 10～15 年程度の短縮がみられる。

次に軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合についてみる。金属燃料炉心は Pu 富化度が 13～14 wt% であり、MOX 燃料炉心と比較して低いため、MA 含有率は最大でも 3.6% であり 5% までには達していない。金属燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合に比べて、燃焼反応度は  $1\ \Delta k/kk'$  以上の増加がみられており、余剰反応度の増加を招く。内部転換比が向上しているが、それに起因して、燃焼による内側炉心及び外側炉心の出力分担率の変化の程度が増加していることから、径方向出力分布変動も増大していることが予想される。ナトリウムボイド反応度は最大で 9.5 \$ にまで達しており、目標の 8 \$ 程度を大きく超過している。このように、炉心・燃料設計検討で基準としている金属燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成使用時に対して、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合の核特性への影響は比較的大きい。金属燃料炉心について、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を想定する場合には、内部転換比やナトリウムボイド反応度を適切に調整するため、炉心高さの縮小等の設計対応が必要であると考えられる。

### 5.2 高増殖炉心の検討

増殖比が 1.1 程度となるように設計した大型炉心（導入期炉心）（2004 年度設計炉心）<sup>[3]</sup>に対し、上部軸方向プランケットの延長ならびに径方向プランケットの付加により、増殖比 1.2～1.3 の高増殖炉心を構築した。これら高増殖炉心は、世界規模でのエネルギー需要を想定した高速炉導入シナリオ検討に資するためのものである。

炉心の主要仕様を表 5-2 に、物量収支を表 5-3、炉心配置を図 5.1～5.4 にそれぞれ示す。増殖比は 1.2～1.3 を満足し、複合システム倍増時間は増殖比 1.2 の炉心では 40 年、増殖比 1.3 の炉心では 25 年となり、導入期炉心と比較して 3 分の 2～半分に短縮される結果となった。

なお、増殖比 1.3 の炉心では径方向プランケットを 2 層設置するかわりに ZrH 遮へい体を 1 層削減している。本検討は増殖性能について核的な可能性を探るためのものであり、遮へいの成立性に関しては課題として残される。

表 5-1 大型金属燃料高出口温度型炉心の TRU 組成変動による炉心特性の比較（導入期炉心）

項目	金属燃料高速炉多通りサイクル組成ケース	LWR 使用済燃料からの回取TRU組成モルベース			
		組成① 30年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料と20年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料から回収したTRUを9:1で混合	組成② 70年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料と40年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料から回収したTRUを3:7で混合	組成③ 40年貯蔵したLWR使用済燃料と40年貯蔵したALWR使用済燃料から回収したTRUを5:5で混合	組成④ 110年貯蔵したブルサーマル使用済燃料とFBFR使用済燃料から回収したTRUを0.5:1.9:7.6で混合
燃料組成	MOX燃料高速炉多通りサイクル組成ケース	1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/ $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{243}\text{Am}/^{242}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{245}\text{Cm}/^{243}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$	1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/ 0.512.0/0.0/1.0/ 0.0/0.0/0.4/0.1	1.9/47.2/24.0/2.4/7.0/ 6.4/9.4/0.0/1.5/ 0.0/0.0/0.2/0.0	2.1/44.5/23.8/1.2/7.7/ 7.5/11.3/0.0/1.8/ 0.0/0.0/0.1/0.0
炉心部取出平均燃焼度 <sup>1)</sup>	97.6 GWd/t	97.2 GWd/t	97.3 GWd/t	97.3 GWd/t	97.3 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 <sup>1)</sup>	88.8 GWd/t	88.4 GWd/t	88.4 GWd/t	88.4 GWd/t	88.4 GWd/t
Pu富化度 <sup>2)</sup>	12.1 wt%	13.1 wt%	13.2 wt%	13.6 wt%	14.7 wt%
核分裂性核種含有率 <sup>2)</sup>	8.8 wt%	8.3 wt%	8.2 wt%	8.1 wt%	7.7 wt%
顆核種含有率 <sup>2)</sup>	91.2 wt%	91.7 wt%	91.8 wt%	91.9 wt%	92.3 wt%
MA含有率 <sup>2)</sup>	0.4 wt%	0.6 wt%	2.8 wt%	3.5 wt%	2.1 wt%
燃焼反応度	0.23 % Δk/kk'	0.49 % Δk/kk'	1.27 % Δk/kk'	1.71 % Δk/kk'	1.44 % Δk/kk'
増殖比(全体)	1.101	1.131	1.128	1.139	1.166
(炉心軸)アシケット	1.032 / 0.069	1.061 / 0.070	1.056 / 0.072	1.066 / 0.073	1.093 / 0.073
最大線出力(内側炉心/外側炉心)	255 / 269 W/cm	259 / 271 W/cm	264 / 273 W/cm	267 / 275 W/cm	266 / 275 W/cm
出力分担率[%] (内側/外側/軸アシ)	50.5/48.1/1.4 50.7/47.2/2.2 +0.2/-0.9/+0.8	50.7/47.9/1.4 51.1/46.8/2.2 +0.4/-1.1/+0.8	50.4/48.2/1.4 51.5/46.5/2.0 +1.1/-1.7/+0.6	50.3/48.3/1.3 51.7/46.3/2.0 +1.4/-2.0/+0.7	50.6/48.0/1.4 51.7/46.3/2.1 +1.1/-1.7/+0.7
最大高速中性子束 <sup>3)</sup>	$3.2 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{s}$	$3.2 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{s}$	$3.2 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{s}$	$3.2 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{s}$	$3.2 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{s}$
最大高速中性子照射量 <sup>3)</sup>	$5.4 \times 10^{-23} \text{n/cm}^2$	$5.5 \times 10^{-23} \text{n/cm}^2$	$5.4 \times 10^{-23} \text{n/cm}^2$	$5.4 \times 10^{-23} \text{n/cm}^2$	$5.4 \times 10^{-23} \text{n/cm}^2$
初期荷核分裂性Pu重量	4.0 t/GWe	3.8 t/GWe	3.8 t/GWe	3.7 t/GWe	3.7 t/GWe
実効遮蔽中性子割合	0.00360	0.00361	0.00350	0.00344	0.00351
炉心部ナトリウムボイド反応度 <sup>4)</sup>	8.2 \$	8.3 \$	9.1 \$	9.5 \$	9.5 \$
ドップラ係数 [Tdk/dT] <sup>4)</sup>	-4.2×10 <sup>-3</sup>	3.9×10 <sup>-3</sup>	-3.2×10 <sup>-3</sup>	-3.0×10 <sup>-3</sup>	-3.3×10 <sup>-3</sup>
原子炉倍増時間	47年	35年	38年	36年	28年
複合システム倍増時間 <sup>6</sup>	66年	50年	53年	50年	40年
					48年

<sup>1)</sup>: プラネット燃料を含む全体の平均燃焼度、<sup>2)</sup>: HM当たり、<sup>3)</sup>: E > 0.1 MeV、<sup>4)</sup>: 集合体内非均質効果考慮、<sup>5)</sup>: 燃料炉外滲在期間5年、燃交・定検期間45日

表5-2 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要仕様（更なる高増殖を目指した炉心）

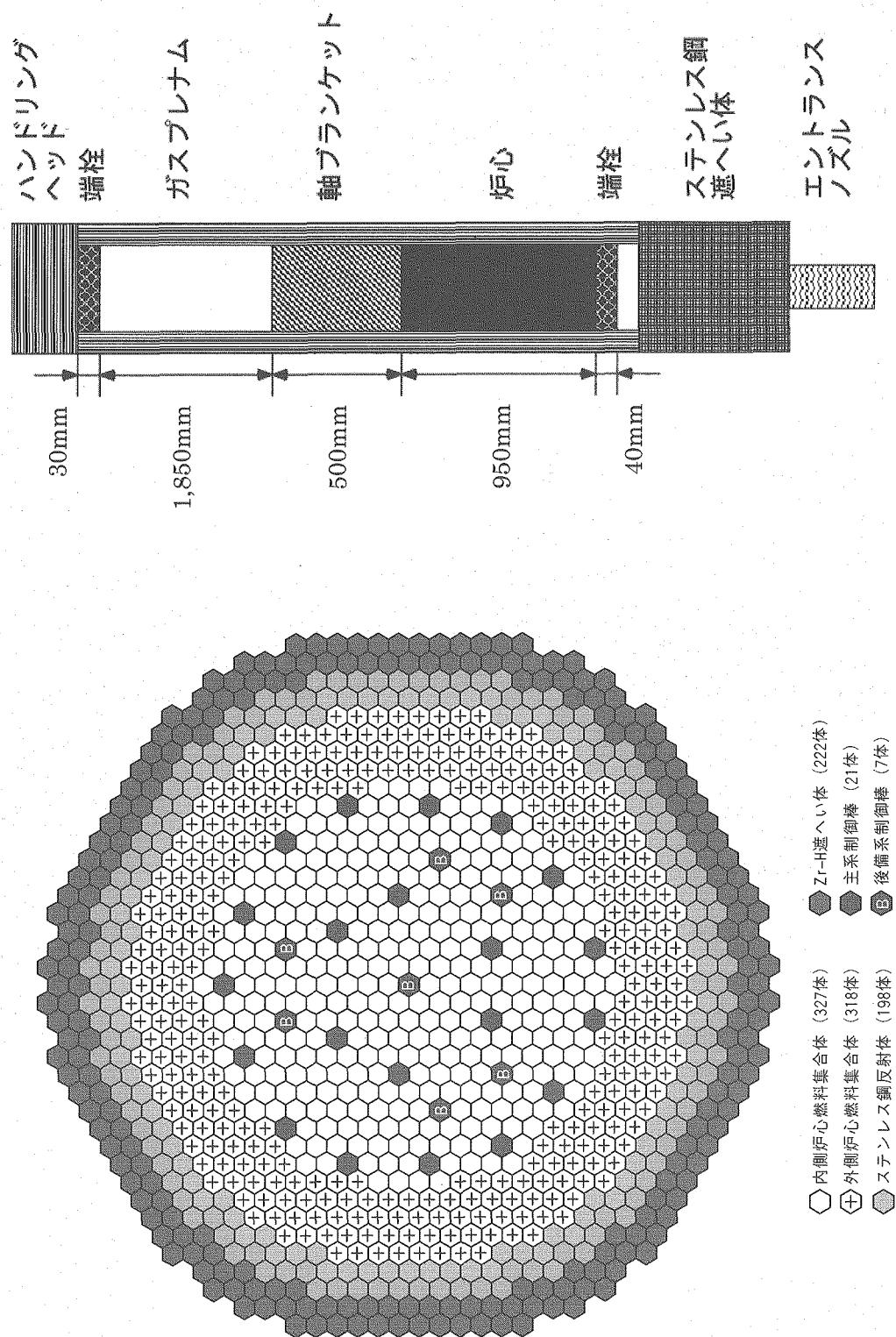
項目	導入期炉心 <sup>*3</sup>	更なる高増殖を目指した炉心			
		炉心①	炉心②	炉心③	炉心④
熱出力 [MWt]	3,570	←	←	←	←
電気出力 [MWe]	1,500	←	←	←	←
運転サイクル長さ [ヶ月]	21.5	21.0	21.5	←	←
燃料交換バッチ数	3	←	←	←	←
炉心高さ [cm]	95	←	←	←	←
上部軸プランケット高さ [cm]	15	50	←	70	←
下部軸プランケット高さ [cm]	0	←	←	←	←
径プランケット層数	0	←	1	←	2
最大バンドル部圧力損失 <sup>*1</sup> [MPa]	0.21	0.23	←	0.25	←
炉心部取出平均燃焼度 [GWd/t]	98.1	94.9	95.9	95.9	95.5
軸プランケット部取出平均燃焼度 [GWd/t]	14.2	5.8	5.8	4.0	4.0
径プランケット部取出平均燃焼度 [GWd/t]	—	—	4.6	4.0	2.5
全炉心 <sup>*2</sup> 取出平均燃焼度 [GWd/t]	87.1	65.3	55.4	48.8	41.3
燃焼反応度 [%Δk/kk']	0.25	0.33	0.36	0.34	0.36
増殖比	1.114	1.192	1.257	1.269	1.310
原子炉倍増時間 [年]	54.9	24.8	18.7	17.9	15.5
複合システム倍増時間 [年]	58.4	41.5	30.7	29.5	25.5

\*1: ブランケット付加による流量配分への影響は未考慮、\*2: 炉心とブランケット

\*3: 2004年度設計炉心

表 5-3 大型金属燃料高出口温度型炉心の物量収支（更なる高増殖を目指した炉心）

項目	更なる高増殖を目指した炉心			
	炉心①	炉心②	炉心③	炉心④
初装荷燃料				
重金属 [t]	104.9	126.5	143.5	169.7
ウラン [t]	96.2	117.9	134.8	161.0
プルトニウム [t]	8.4	8.4	8.4	8.4
核分裂性プルトニウム [t]	5.9	5.9	5.9	5.9
Pu-241 [t]	0.21	0.21	0.21	0.21
平衡装荷燃料				
重金属 [t]	35.0	42.2	47.8	56.6
ウラン [t]	32.1	39.3	44.9	53.7
プルトニウム [t]	2.8	2.8	2.8	2.8
核分裂性プルトニウム [t]	2.0	2.0	2.0	2.0
Pu-241 [t]	0.07	0.07	0.07	0.07
初期取出燃料				
重金属 [t]	34.2	41.3	47.0	55.7
ウラン [t]	31.1	38.2	43.9	52.6
プルトニウム [t]	3.0	3.0	3.0	3.1
核分裂性プルトニウム [t]	2.1	2.2	2.2	2.2
Pu-241 [t]	0.08	0.08	0.08	0.08
平衡取出燃料				
重金属 [t]	32.5	39.7	45.4	54.1
ウラン [t]	29.2	36.2	41.8	50.4
プルトニウム [t]	3.3	3.4	3.5	3.6
核分裂性プルトニウム [t]	2.4	2.5	2.6	2.7
Pu-241 [t]	0.10	0.10	0.10	0.10
廃炉時取出燃料				
重金属 [t]	100.1	121.6	138.6	164.8
ウラン [t]	90.3	111.5	128.4	154.5
プルトニウム [t]	9.5	9.8	9.9	10.0
核分裂性プルトニウム [t]	6.9	7.2	7.2	7.4
Pu-241 [t]	0.28	0.27	0.27	0.27



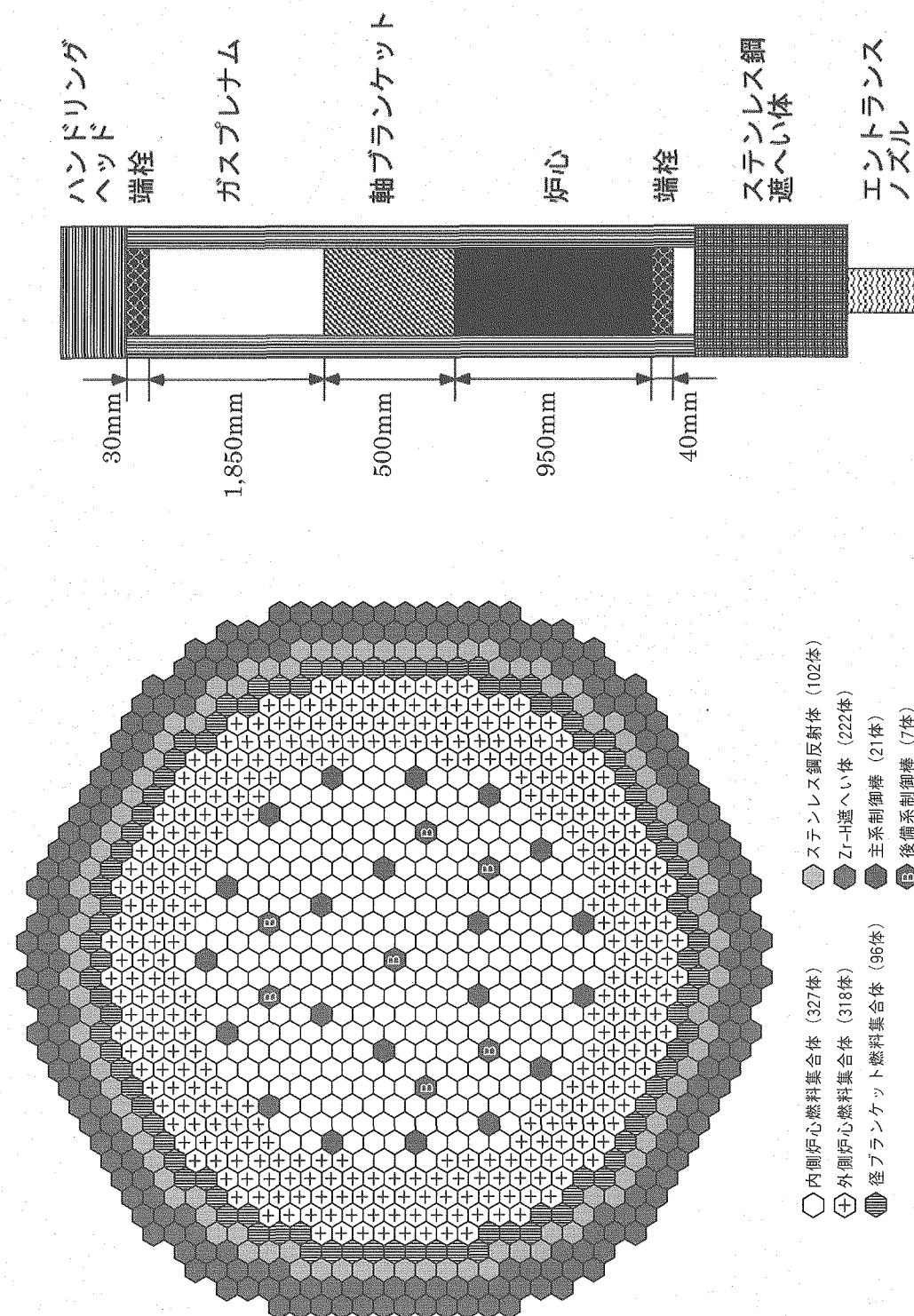


図 5-2 大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図 (炉心② (増殖比 1.26))

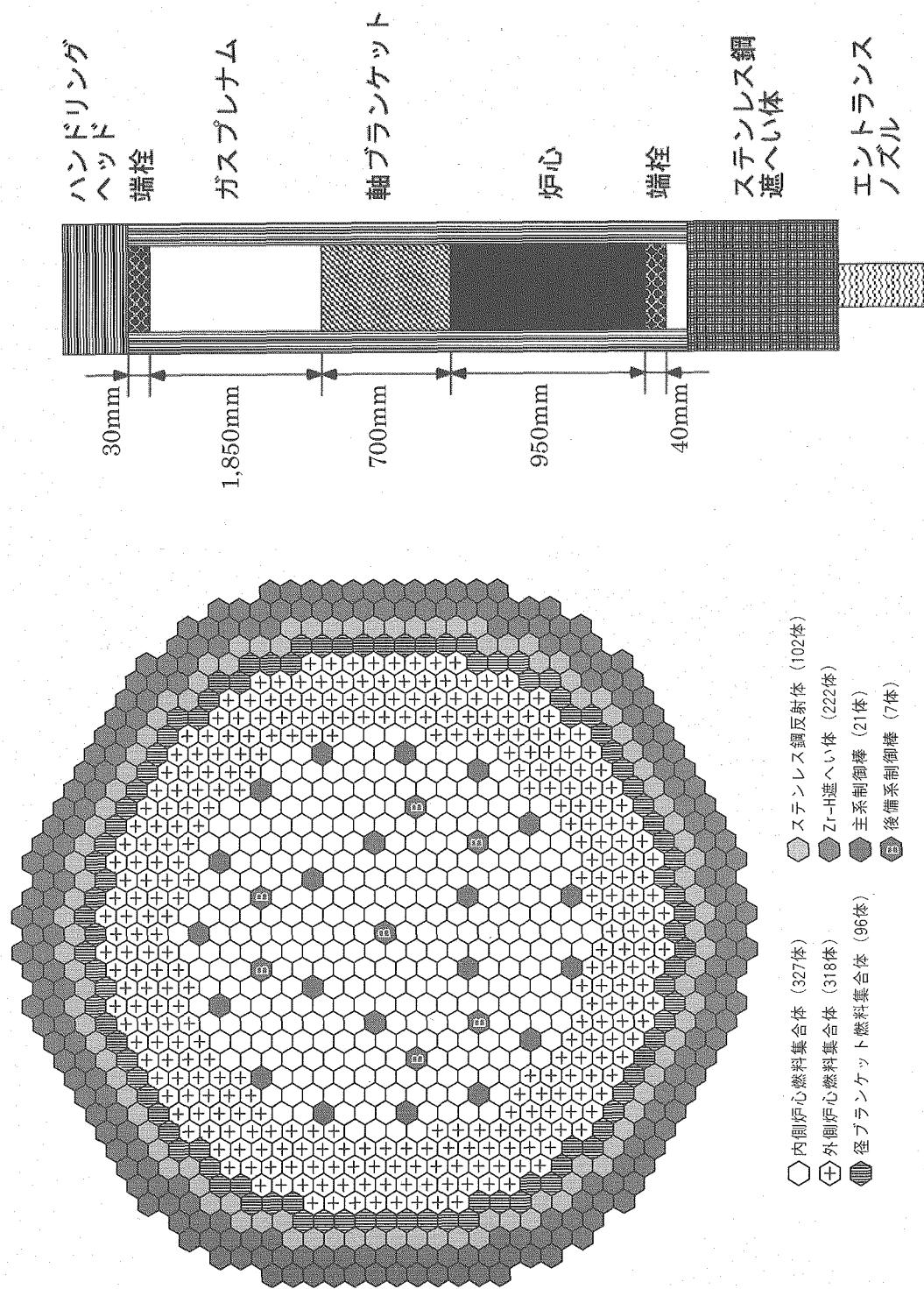


図 5-3 大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図 (炉心③ (増殖比 1.27))

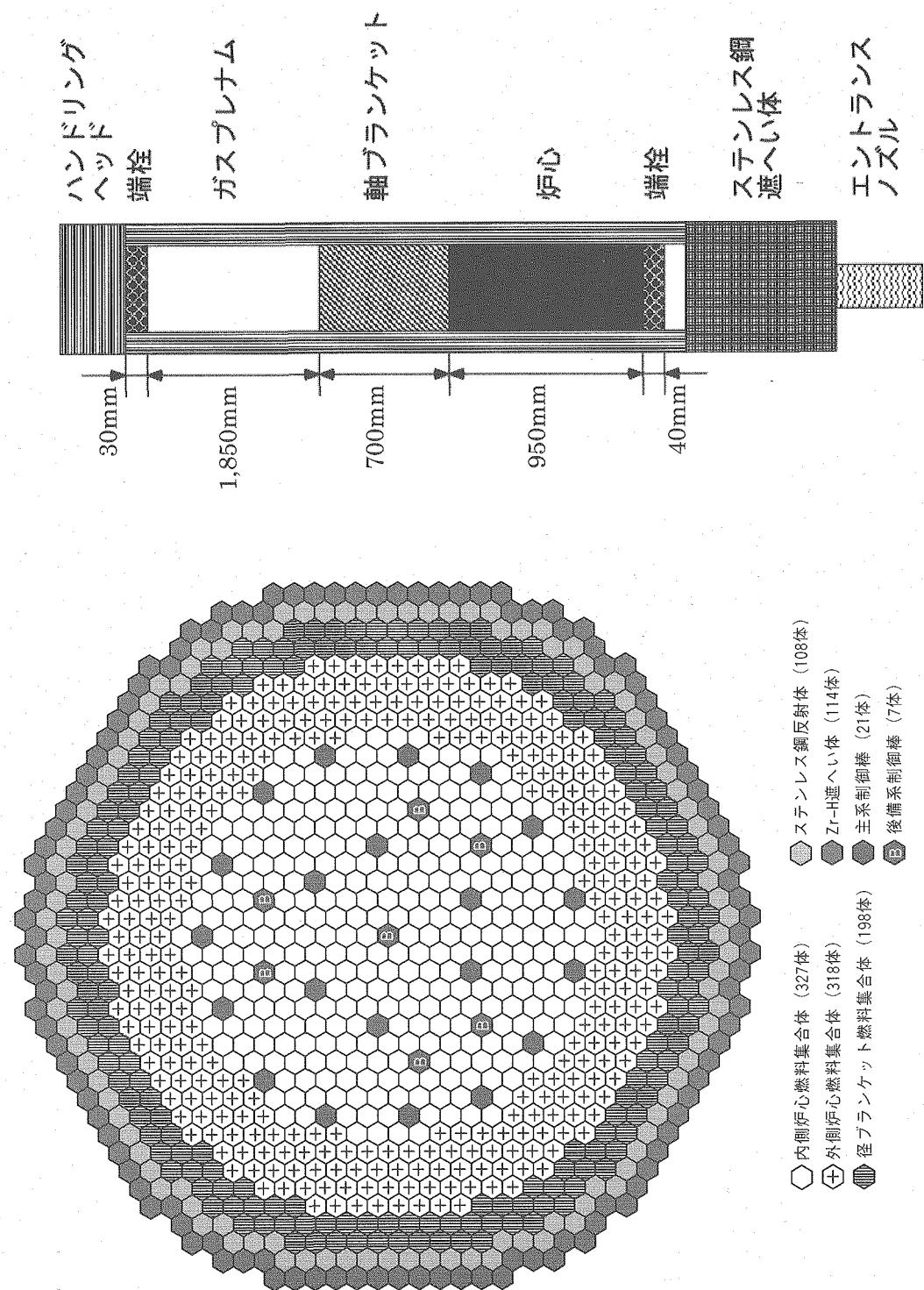


図 5-4 大型金属燃料高出口温度型炉心の炉心配置図 (炉心④ (増殖比 1.31))

## 6. 制御棒挿入深度の詳細モデル化に係る設計合理化検討

金属燃料炉心は再処理・燃料製造のバッチ処理に起因して炉心全体では燃料製作公差が非常に小さく、余剰反応度の不確かさがそれに比例して小さくなる。これより、余剰反応度の不確かさを適切に考慮して制御棒挿入深度を詳細にモデル化することにより、さらなる高出口温度化をめざした設計合理化の可能性がある。そこで、第3章で設定した大型金属燃料高出口温度型炉心(平衡期炉心)を対象に次の検討を行った。

まず、工学的安全係数の出力分布誤差要因のうち制御棒位置偏差にかかる成分の合理化効果を調べるために、制御棒位置偏差による出力歪みの解析を行った(第6.1節)。次に、燃焼初期及び末期の制御棒挿入深度について、余剰反応度不確かさの合理化や燃焼末期全引き抜きとした現行の設定方法の見直しを行った場合の被覆管内面最高温度の低減効果を評価した(第6.2節)。

### 6.1 制御棒位置偏差による出力歪みの解析

大型金属燃料高出口温度型炉心(平衡期炉心)を対象に、制御棒位置偏差制限を複数ケース設定し、各制限下での出力歪みを解析した。

#### (1) 検討方法及び条件

##### (a) 検討方法

主炉停止系制御棒均等挿入(基準)状態と制御棒位置偏差時の出力分布を解析し、出力歪み量を評価する。ここで、出力歪み量は基準状態と制御棒位置偏差時の燃料要素積分出力最大値を燃料集合体毎に求め、その比により算出した。

なお、制御棒の挿入深度は第2章に示す各種補正及び不確かさを考慮して設定した。また、均等挿入時の解析値が補正係数を考慮したノミナル値と一致するようにB<sub>4</sub>Cを希釈した条件で評価した。

##### (b) 解析条件

解析条件を以下に示す。

- ・ 出力分布計算： 3次元7群拡散計算(三角メッシュモデル)
  - ・ 評価時期： 平衡サイクル初期
  - ・ 主炉停止系制御棒の挿入深度(後備炉停止系は全引抜き)
- 主炉停止系制御棒の挿入深度は、以下の反応度を制御できるように設定した。

###### ① 基準(第3.2節参照)

$$1.56 \% \Delta k/k' [燃焼補償+運転余裕+余剰反応度不確かさ(2\sigma)]$$

② 上記①に対し、余剰反応度不確かさを未考慮(燃料製作公差等からなる余剰反応度不確かさが合理化された場合を内挿で評価するために設定)

$$1.05 \% \Delta k/k' [燃焼補償+運転余裕]$$

- ・ 対象制御棒： 位置偏差時に最大出力歪みが発生する制御棒
- ・ 制御棒のB<sub>4</sub>C希釈率： サーベイ解析により設定
- ・ 制御棒位置偏差： 20 mm(基準)\*、25 mm\*\*

\* 実証炉最適化設計研究の設定値

\*\* 制御棒駆動制限条件の緩和を図ったケース（金属燃料高出口温度型炉心は定格運転時の制御棒挿入深度が小さく、そのため単位長さあたりの制御棒価値が小さくなることから、制御棒駆動制限条件を緩和できる可能性がある。内外挿で影響を評価するためのサーベイ点として設定。）

## (2) 検討結果

### (a) 主炉停止系制御棒挿入深度

対象炉心の制御棒挿入深度と制御棒価値の関係より、 $1.56\% \Delta k / k k'$  の反応度を制御するための制御棒挿入深度は 33 cm、 $1.05\% \Delta k / k k'$  の反応度を制御するための制御棒挿入深度は 26 cm と求められた。

### (b) 出力歪み量評価

表 6-1 に最大出力歪み量（制御棒位置偏差効果）及び被覆管最高温度評価用出力分布誤差を示す。主炉停止系制御棒 33 cm 插入時の最大出力歪み量は制御棒位置偏差を 20 mm に設定した場合、内側炉心が 2.1%、外側炉心が 2.3% となり、制御棒位置偏差を 25 mm に設定した場合、内側炉心が 2.5%、外側炉心が 2.8% となる。また、主炉停止系制御棒 26 cm 插入時の最大出力歪み量は制御棒位置偏差を 20 mm に設定した場合、内側炉心が 1.7%、外側炉心が 1.9% となり、制御棒位置偏差を 25 mm に設定した場合、内側炉心が 2.0%、外側炉心が 2.3% となる。これらの結果と出力分布予測誤差（0.9%）を基に被覆管最高温度評価用出力分布誤差を評価すると、内側炉心が 2.0%～2.7%、外側炉心が 2.1%～3.0% となる。

主炉停止系制御棒挿入深度及び位置偏差量を実証炉最適化設計研究の考え方に基づいて設定（制御棒挿入深度 33 cm、位置偏差量 20 mm）した場合は、表 6-1 に示すとおり、最大歪み量が 2.3%、出力分布予測誤差（0.9%）を考慮した被覆管最高温度評価用の出力分布誤差が 2.5% となる。これは、熱流力特性評価で用いた工学的安全係数の値（第 2 章 (4) (a) 参照）と整合する。

燃料製作公差の減少に基づく余剰反応度不確かさの減少により、出力分布誤差を 2.1%～2.5% の間で、さらに合理化できる可能性のあることがわかった。

なお、制御棒駆動制限条件の緩和を想定して、制御棒位置偏差を 20 mm から 25 mm に変更した場合、出力分布誤差にして 0.4～0.5% の増加に結びつくことがわかった。

## 6.2 燃焼初期及び末期の制御棒挿入深度を反映した被覆管内面最高温度の低減化検討

第 3 章で設定した大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期炉心）を対象に、平衡サイクル初期及び末期の制御棒挿入深度を複数ケース設定し、各々のケースについて流量配分を行い、被覆管内面最高温度を評価した。

### (1) 検討条件

検討条件を以下に示す。

- ・ 出力分布計算： 3 次元 7 群拡散・燃焼計算（六角修正粗メッシュモデル）
- ・ 主炉停止系制御棒の挿入深度（後備炉停止系は初期、末期とも全引抜き）

主炉停止系制御棒の挿入深度は、以下の反応度を制御できるように設定した。

① 基準（第3.2節参照）

平衡サイクル初期：  $1.56 \% \Delta k/kk'$

[燃焼補償+運転余裕+余剰反応度不確かさ( $2\sigma$ )]

平衡サイクル末期： 全引抜き

② 通常運転時の制御棒挿入深度を想定

平衡サイクル初期：  $1.56 \% \Delta k/kk'$

[燃焼補償+運転余裕+余剰反応度不確かさ( $2\sigma$ )]

平衡サイクル末期：  $0.71 \% \Delta k/kk'$

[運転余裕+余剰反応度不確かさ( $2\sigma$ )]

③ 上記②に対し、余剰反応度不確かさを未考慮

平衡サイクル初期：  $1.05 \% \Delta k/kk'$  [燃焼補償+運転余裕]

平衡サイクル末期：  $0.20 \% \Delta k/kk'$  [運転余裕]

- ・ 被覆管温度計算方法： 第2章(3)(f)参照
- ・ 工学的安全係数： 第2章(4)参照（表2-2参照）
- ・ 流量領域区分： 図6-1に示す11流量領域区分とした。

## (2) 検討結果

### (a) 主炉停止系制御棒挿入深度

対象炉心の制御棒挿入深度と制御棒価値の関係より、平衡サイクル初期において  $1.56 \% \Delta k/kk'$  の反応度を制御するための制御棒挿入深度は 31 cm、 $1.05 \% \Delta k/kk'$  の反応度を制御するための制御棒挿入深度は 24 cm と求められた（第6.1節における制御棒挿入深度との違いは中性子束解法モデルの違いによると考えられる）。

また、平衡サイクル末期においては、 $0.71 \% \Delta k/kk'$  の反応度を制御するための制御棒挿入深度は 17 cm、 $0.20 \% \Delta k/kk'$  の反応度を制御するための制御棒挿入深度は 6 cm となつた。

### (b) 制御棒挿入深度変更時の熱流力特性

表6-2に制御棒挿入深度変更時の熱流力特性を示す。流量配分後の被覆管内面最高温度は制御すべき反応度を①とした場合が 638°C であるのに対し、②、③とした場合はともに 636°C となった。

これより、平衡サイクル末期での現実的な制御棒挿入深度の採用（②）によって、わずか（2°C程度）ではあるが被覆管内面最高温度を低減できることがわかった。余剰反応度の不確かさの低減（③）による被覆管内面最高温度の低減効果は、ほとんど見られなかつた。

表 6-1 大型金属燃料高出口温度型炉心における制御棒位置偏差時の  
最大出力歪み量及び出力分布誤差 (平衡期炉心)

制御棒 挿入深度 (cm)	位置偏差 (mm)	最大歪み量(%) <sup>*1</sup> [制御棒位置偏差効果]		出力分布 予測誤差(%)	出力分布誤差(%) <sup>*2</sup> [被覆管温度評価用]	
		内側炉心	外側炉心		内側炉心	外側炉心
33	20	2.1	2.3	0.9	2.3	2.5
	25	2.5	2.8	0.9	2.7	3.0
26	20	1.7	1.9	0.9	2.0	2.1
	25	2.0	2.3	0.9	2.3	2.5

\*1: 燃料要素最大出力の比

\*2: 統計処理 ( $\sqrt{(出力分布予測誤差^2 + 最大歪み量^2)}$ )

表 6-2 大型金属燃料高出口温度型炉心における制御棒挿入深度変更時の炉心熱流力特性（平衡期炉心）

領域 No.	流量 燃料 体数	①[PCR挿入深度 BOEC31cm/EOEC全引抜き; 基準]			②[PCR挿入深度 BOEC31cm/EOEC17cm]			③[PCR挿入深度 BOEC24cm/EOEC 6cm]				
		集合体 最大出力 (MW)	集合体 流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	被覆管 内面温度 (°C)	集合体 最大出力 (MW)	集合体 流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	被覆管 内面温度 (°C)	集合体 最大出力 (MW)	領域流量 (kg/s)	被覆管 内面温度 (°C)
内側炉心	1	78	6.94	30.9	2410	637	6.97	31.2	2434	636	6.94	31.1
	2	114	6.55	29.5	3363	637	6.48	29.1	3317	636	6.52	29.5
	3	75	6.24	27.8	2085	637	6.21	27.7	2078	636	6.23	27.9
	4	30	5.91	26.2	786	638	5.72	25.8	774	636	5.83	26.1
	小計	297	-	-	8644	-	-	-	8603	-	-	-
外側炉心	5	102	7.05	31.8	3244	637	7.05	31.7	3233	636	7.06	32.0
	6	72	6.29	28.6	2059	638	6.29	28.8	2074	636	6.25	28.7
	7	48	5.34	25.3	1214	638	5.35	25.6	1229	636	5.21	25.0
	8	36	4.56	22.6	814	638	4.56	22.8	821	636	4.45	22.3
	9	30	3.71	19.0	570	638	3.71	19.2	576	636	3.59	18.6
	10	36	3.08	16.4	590	638	3.07	16.5	594	635	2.98	16.0
	11	24	2.47	14.0	336	638	2.47	14.2	341	635	2.39	13.7
	小計	348	-	-	8827	-	-	-	8867	-	-	-
合計		645	-	-	17471 *1	-	-	-	17470 *1	-	-	-

\*1: 燃料集合体に配分可能な流量 . . . . . 17472 kg/s [燃料以外への流量配分 = 4%]

3分の1炉心（回転対称）

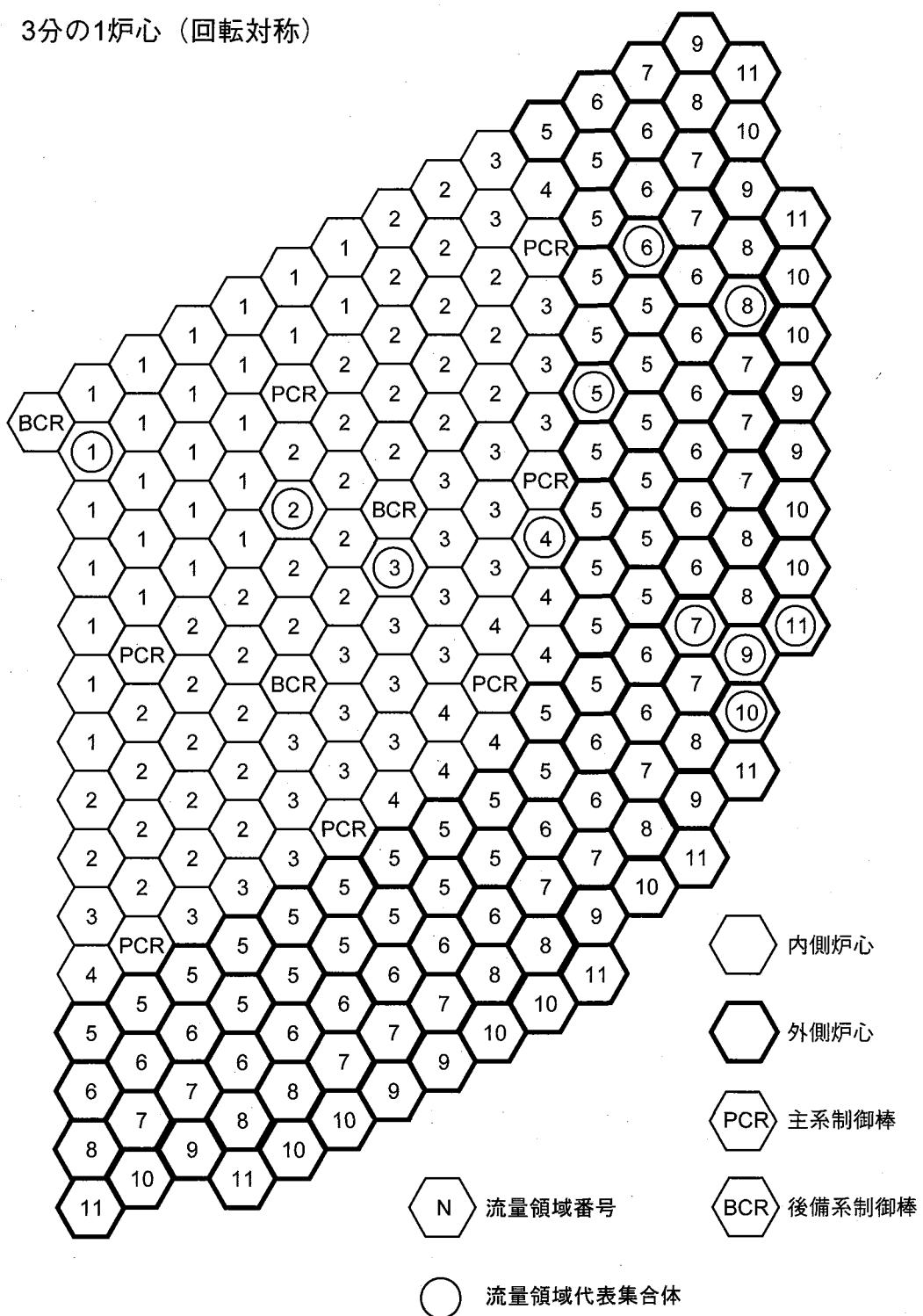


図 6-1 大型金属燃料高出口温度型平衡期炉心の流量配分領域図（11 流量領域）

## 7. ODS 鋼代替炉心の検討

本炉心の被覆管材には高温強度及び耐照射性に優れる ODS 鋼（酸化物分散強化型フェライト鋼）を採用している。しかし ODS 鋼は開発段階の材料であることから、代替材として PNC-FMS 鋼を用いる炉心の検討を行った。PNC-FMS 鋼は ODS 鋼と比較して 650°C 以上におけるクリープ強度の低下が大きい材料であり、ODS 鋼を被覆管材として構築した炉心に PNC-FMS 鋼を用いた場合には炉心出口温度を大幅に下げる必要となる。

本検討は、大型金属燃料高出口温度型平衡期炉心を対象として、被覆管材に PNC-FMS 鋼を用いた場合の炉心性能の変化をみるものであり、PNC-FMS 鋼の高温強度不足に対して、燃料ピンのガスプレナム長さの伸長及び被覆管の厚肉化により原子炉出口温度の低下を抑制した代替炉心について検討したものである。

### (1) 検討条件

#### (a) 炉心・燃料仕様及び性能

- ・ 炉心： 大型金属燃料高出口温度型平衡期炉心（2004 年度設計炉心）<sup>[3]</sup>
- ・ 原子炉出入口温度差： 155 °C
- ・ 炉心燃料外接円径： 6.1 m 以下（遮へい体外接円径 8.1 m / 炉容器径 11 m に対応）
- ・ 燃料バンドル部圧損： 0.2 MPa 程度以下
- ・ 燃料集合体全長： 5.4 m 以下
- ・ 増殖比： 1.03 程度

#### (b) 制限条件

- ・ CDF： 0.5 以下
- ・ 被覆管最高温度(内面)： 650 °C 以下
- ・ 最大線出力： 500 W/cm 以下
- ・ ポイド反応度： 8 \$ 程度 以下

#### (c) クリープ強度

- ・ クリープ破断強度式： PNC-FMS 鋼暫定評価式<sup>[14,15]</sup>
- ・ 内外面腐食式： ODS 鋼暫定評価式<sup>[9]</sup>

### (2) 評価結果

表 7-1 に炉心・燃料仕様のサーベイ計算結果を示す。被覆管の寸法仕様を ODS 鋼による基準炉心と同一とし、被覆材を PNC-FMS 鋼に変更するだけの場合には、CDF に対する制限条件（0.5 以下）を満足させるため、原子炉出口温度を 532 °C まで低下させる必要がある。これに対して、被覆管肉厚は同一のまま上部ガスプレナム長さを 2,605 mm まで伸長して燃料集合体全長を 5.4 m としたケースでは原子炉出口温度を 541 °C とすることが可能となる。さらに炉心燃料外接円径の増加を大型 MOX 燃料炉心と同等の 5.8 m まで許容して、被覆管を 0.42 mm から 0.78 mm まで厚肉化したケースでは、燃料バンドル部圧損が若干増大するものの原子炉出口温度は 548 °C が可能である。炉心燃料外接円径の増加を 6.1 m まで許容して被覆管肉厚を

0.90 mmとしたケースでも原子炉出口温度は 549 °Cであり、炉心燃料外接円径 5.8 mのケースからの温度上昇は 1 °Cである。

以上の結果より、被覆管材に PNC-FMS 鋼を採用した代替炉心として、集合体全長を 5.4 m、炉心燃料外接円径を 5.8 mとした原子炉出口温度 548 °Cの炉心を選定した。表 7-2 に炉心の主要仕様及び特性を示す。炉心寸法、燃料仕様の変更があるが、ODS 鋼を用いた基準炉心とほぼ同一の炉心特性が得られている。

表 7-1 大型金属燃料高出口温度型 ODS 鋼代替炉心のサーベイ計算結果（平衡期炉心）

項目	単位	基準仕様 (代表炉心寸法)	ガスプレナム伸長		ガスプレナム伸長 + 被覆管厚変化 炉心燃料外接円径 5.8m
			炉心燃料外接円径 6.1m	↓	
炉心熱出力	MWt	3,570	↓	↓	↓
炉心高さ	cm	95	↓	↓	↓
燃料集合体数(内側/外側/合計)	体	327 / 318 / 645	↓	↓	↓
被覆管	材料	—	PNC-FMS鋼	↓	↓
	外径	mm	7.2	↓	↓
	肉厚	mm	0.42	↓	↓
燃料要素	上部ガスプレナム長さ	mm	1,850	2,605	↓
	全長	mm	2,870	3,625	↓
	燃料ピン本数	—	331	↓	↓
集合体	全長	m	4.6	5.4	↓
	集合体配列ピッチ	mm	172.4	↓	204.7
	体積比	燃料 構造材	%	40.9	↓
			%	24.0	40.3
炉心燃料外接円径	遮へい体外接円径	m	4.8	↓	28.4
		m	5.9	↓	5.8
運転サイクル長さ	ヶ月	21.5	↓	7.0	7.5
Pu富化度[Pu/HM]	wt%	12.4	↓	30.0	34.0
燃焼反応度	% $\Delta k/kk'$	0.48	↓	12.5	12.5
取出平均燃焼度	GWD/t	100	↓	0.52	0.54
増殖比	—	1.03	↓	1.03	1.03
原子炉出口温度	°C	532	541	548	549
原子炉入口温度	°C	377	386	393	394
被覆管最高温度(内面)*	°C	619	628	641	642
被覆管CDF	—	0.5	0.5	0.5	0.5
燃料ピンドル部圧損	MPa	0.21	0.26	0.22	0.20

\* ホットスポット値

表 7-2 大型金属燃料高出口温度型 ODS 鋼代替炉心の主要仕様  
および特性（平衡期炉心）

項目	ODS鋼代替炉心	基準炉心 (2004年度設計炉心)
炉心・燃料仕様	炉心熱出力 (MWt)	3,570 ←
	原子炉出口／入口温度 (°C)	548 / 393 550 / 395
	運転サイクル長さ (ヶ月)	30 21.5
	燃料交換/バッチ数	3 ←
	炉心高さ (cm)	95 ←
	炉心燃料集合体数[内側/外側/合計]	363 / 282 / 645 327 / 318 / 645
	燃料被覆管外径 (mm)	9.1 7.2
	燃料被覆管肉厚 (mm)	0.78 0.42
	燃料Zr含有率[内側/外側] (wt%)	10.0 / 6.0 ←
	燃料スミア密度[内側/外側] (%)	72 / 75 70 / 75
	燃料要素上部ガスプレナム長さ (mm)	2,605 1,760
	燃料要素全長 (mm)	3,625 2,780
	燃料集合体全長 (m)	5.4 4.6
	集合体配列ピッチ (mm)	204.7 172.4
炉心特性	炉心燃料外接円径 (m)	5.8 4.7
	遮へい体外接円径 (m)	7.0 5.9
	Pu富化度[Pu/HM] (wt%)	12.4 12.4
	取出平均燃焼度 (GWd/t)	100 100
	燃焼反応度 (%Δk/kk')	0.45 0.48
	増殖比	1.03 1.03
	最大線出力[内側/外側] (W/cm)	258 / 303 274 / 270
	最大高速中性子照射量 * <sup>1</sup> ( $\times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup> )	5.3 5.4
	初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)	5.7 4.1
	ドップラ係数 * <sup>2</sup> [Tdk/dT;平衡末期]	$-4.3 \times 10^{-3}$ $-4.2 \times 10^{-3}$

\*<sup>1</sup> E≥0.1MeV

\*<sup>2</sup> 非均質効果考慮

## 8. 制御棒長寿命化検討

大型金属燃料高出口温度型炉心（2004年度設計炉心）<sup>[3]</sup>を対象として、制御棒長寿命化の可能性について概略検討を行った。

### (1) 制御棒基本仕様

主炉停止系制御棒(PCR)及び後備炉停止系制御棒(BCR)は、吸収材( $B_4C$ ペレット)を充填した制御要素と制御要素バンドルを支持する保護管から成り、制御棒下部案内管とともに制御棒集合体を構成している。

制御要素は、 $B_4C$ ペレットからのHeガス放出による内圧の上昇を回避するためにペント型とし、 $B_4C$ ペレットの温度を抑制するためにナトリウムボンド型とした。また、 $B_4C$ ペレットのリロケーション抑制のために2重シュラウド管を採用した。

### (2) 長寿命制御棒の検討

制御反応度収支を満足する制御棒の $^{10}B$ 装荷量を確保すること条件として、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)に着目した長寿命化制御棒仕様の検討を行った。

#### (a) 検討条件

制御要素バンドルは、 $B_4C$ 体積比及び被覆管とシュラウド管とのギャップを確保するため有利と考えられる19ピン配列構造(三角+四角配列)とした。下部案内管と保護管のアニュラス部ギャップは、制御棒のスクラム性を考慮し、下記を条件とした。

- ・PCR : > 5 mm
- ・BCR : > 10 mm

寿命評価は、制御要素被覆管とシュラウド管のギャップが閉じた(ACMI開始)時点で寿命に達したものとした。

#### (b) 検討結果

##### 1) 基準制御棒仕様

大型金属燃料高出口温度型炉心における制御棒に関する要件( $B_4C$ 体積比、 $^{10}B$ 濃縮度)を基に、本検討で基準とする制御棒の仕様を設定した。表8-1に基準とする制御棒仕様を示す。

##### 2) 必要最少 $^{10}B$ 装荷量

前記1)項の制御棒仕様を基に、 $^{10}B$ 濃縮度をパラメータとした制御棒価値の評価を行い、制御反応度収支を満足するために必要な $^{10}B$ 装荷量を求めた。

###### a) 評価手法・条件

制御棒価値の評価手法と条件を以下に示す。

- ・制御棒価値：3次元7群拡散計算(三角メッシュモデル)

・補正係数	
群縮約効果	0.97
非均質効果	0.89 (最新知見を反映)
輸送効果	0.96
メッシュ補正(三角→無限小)	1.07
合 計	0.89
・不確かさ(予測誤差)	9 % (3σ)

制御反応度収支の評価に用いた必要制御反応度以下に示す。

- ・PCR(ワンロッドスタック) 2.7%Δk/kk'

\* 炉停止余裕 1\$(0.4%Δk/kk')を考慮

- ・BCR

ワンロッドスタック	0.5%Δk/kk'
全数挿入	0.7%Δk/kk'

### b) 評価結果

図 8-1 に  $^{10}\text{B}$  濃縮度と制御棒価値の関係を示す。これより制御反応度収支を満足するためには必要な  $^{10}\text{B}$  濃縮度は PCR が 30 wt%程度以上、BCR が 20 wt%程度(天然ボロン)以上であり、制御棒 1 本の必要最少  $^{10}\text{B}$  装荷量は PCR が 3.3 kg、BCR が 2.6 kg となる。

### 3) 長寿命化制御棒仕様

前記 2)項で求めた必要最少  $^{10}\text{B}$  装荷量を満足することを条件として、 $^{10}\text{B}$  濃縮度の低減及び  $\text{B}_4\text{C}$  ペレットの細径化による制御棒長寿命化の検討を行った。また、長寿命化制御棒について  $^{10}\text{B}$  の燃焼を考慮した制御棒価値評価を行い、制御反応度収支の成立性を確認した。

#### a) 評価手法・条件

$\text{B}_4\text{C}$  燃焼度の評価手法を以下に示す。

- ・ $^{10}\text{B}$  反応率： 3 次元 7 群拡散計算 (三角メッシュモデル)
- ・制御棒内反応率ピーキング： 2 次元 RZ 拡散計算 (炉中心制御棒均質及びリング化モデル)

ACMI 評価に用いた  $\text{B}_4\text{C}$  ペレットのスエリング式と温度条件を以下に示す。

- ・ $\text{B}_4\text{C}$  ペレットスエリング式 (ナトリウムボンド型)

$$\Delta D/D = (0.163 \cdot BU + 5.7) / 3$$

$\Delta D/D$ ： 径方向スエリング率 (%)

BU：  $\text{B}_4\text{C}$  燃焼度 ( $\times 10^{26} \text{ cap}/\text{m}^3$ )

適用範囲：  $\leq 240 \times 10^{26} \text{ cap}/\text{m}^3 (= 2.4 \times 10^{22} \text{ cap}/\text{cc})$

- ・温度条件： 200 °C (燃料交換時温度)

b) 評価結果

表 8-1 に長寿命化制御棒の仕様を示し、図 8-2 には PCR 及び BCR の寿命を燃料集合体と同じ 3 サイクルとした長寿命化制御棒の概念図を示す。また、表 8-2 には、長寿命化制御棒の照射特性を示し、図 8-3 には PCR 及び BCR の外側シラウド管外径の経時変化を示す。

以上の評価結果より、PCR は  $^{10}\text{B}$  濃縮度を 30 wt%、 $\text{B}_4\text{C}$  ペレット径を 20.4 mm とすることで寿命を燃料と同じ 3 サイクルとすることが可能な見通しである。BCR は  $^{10}\text{B}$  濃縮度を 20 wt% とすること(ペレット径は基準仕様の 22.0 mm)により 3 サイクル寿命が可能な見通しである。ただし、 $\text{B}_4\text{C}$  ペレットの燃焼度がスエリング式の適用範囲を大幅に超えること、PCR の場合  $\text{B}_4\text{C}$  ペレットの細径化による被覆管とのギャップの増加とシラウド管(変形が大きい)の健全性が課題となる。

表 8-1 大型金属燃料高出口温度型炉心の長寿命化制御棒仕様

項 目	単 位	主炉停止系制御棒			後端停止系制御棒		
		基 準	長寿命化		基 準	長寿命化	
			3サイクル寿命	最長寿命		3サイクル寿命	最長寿命
吸収材ペレット	外径	mm	22.2	20.4	22.0	←	11.4
	理論密度比	%	95.0	←	95.0	←	←
	<sup>10</sup> B濃縮度	wt%	80	30	80	20	80
被覆管	材料	—	ODSS鋼	←	ODSS鋼	←	—
	外径	mm	29.0	←	28.0	←	—
	肉厚	mm	0.6	←	0.6	←	—
外側シラカド管	外径	mm	23.6	21.8	23.4	←	12.8
	肉厚	mm	0.3	←	0.3	←	—
	内側シラカド管	mm	22.9	21.1	22.7	←	12.1
スパイサ	肉厚	mm	0.3	←	0.3	←	—
	型式	—	ワイヤ	←	ワイヤ	←	—
	外 径	mm	1.0	←	1.0	←	—
制御棒要素	型式	—	Naボンド・ベント	←	Naボンド・ベント	←	—
	外側シラカド管-被覆管キャップ[直径]	mm	4.4	6.2	13.8	3.6	14.2
	B <sub>4</sub> Cペレットタック長	mm	950	←	950	←	—
保護管	材料	—	PNC-FMS鋼	←	PNC-FMS鋼	←	—
	外径	mm	153.7	←	148.7	←	—
	肉厚	mm	3.0	←	3.0	←	—
案内管	材料	—	PNC-FMS鋼	←	PNC-FMS鋼	←	—
	外径	mm	168.7	←	168.7	←	—
	肉厚	mm	5.0	←	5.0	←	—
集合体	制御要素本数	—	19	←	19	←	—
	制御要素配列ピッチ	mm	30.3	←	29.2	←	—
	体積比	B <sub>4</sub> C (実効)	% (27.1)	24.1 (22.9)	9.5 (9.0)	28.1 (26.7)	7.5 (7.2)
<sup>10</sup> B重量	構造材	%	22.7	22.5	21.4	22.4	20.9
	冷却材	%	48.7	53.4	69.1	49.6	71.6
		kg/1本	9.8	3.3	3.3	9.7	2.6

表 8-2 大型金属燃料高出口温度型炉心の長寿命化制御棒の照射特性

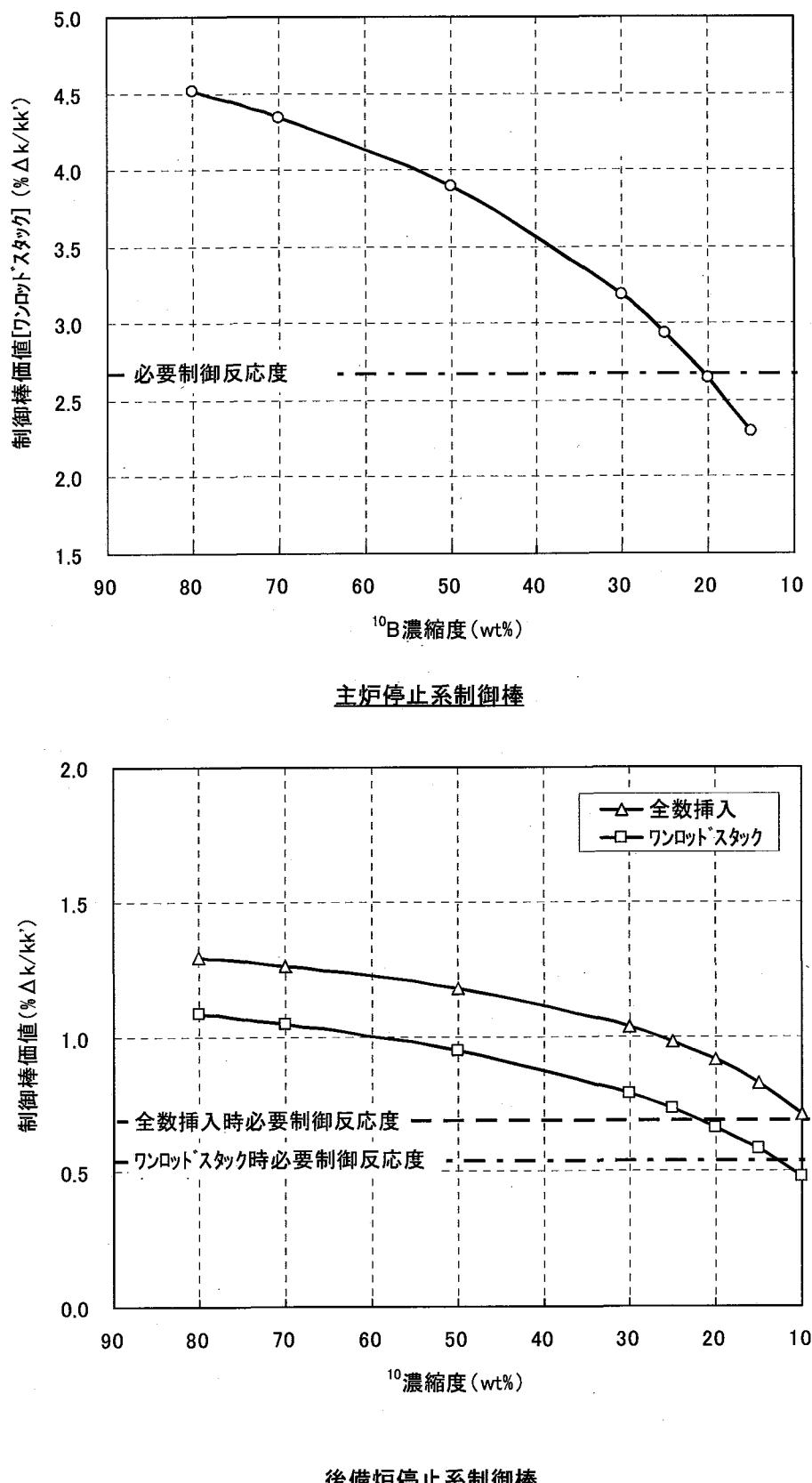
項 目		主炉停止系制御棒		後備炉停止系制御棒	
		基準	長寿命化	基準	長寿命化
仕様	$^{10}\text{B}$ 濃縮度 (wt%)	80	30	80	20
	$\text{B}_4\text{C}$ ペレット外径 (mm)	22.2	20.4	12.8	—
	$^{10}\text{B}$ 装荷量 (kg/体)	9.8	3.3	3.3	2.6
使用条件	運転サイクル長さ (ヶ月)	21.5	—	—	—
	使用期間 [寿命] (年)	1 (サイクル)	3	4	1
	$\text{B}_4\text{C}$ 燃焼度 (cap/cc)	局所最高 *1	2.6E+22	4.3E+22	1.6E+23
最大高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> ·s)	領域平均 *2	1.3E+21	3.0E+21	—	1.1E+21
	$\text{B}_4\text{C}$ ペレット-被覆管間ギャップ *3 [直径] (mm)	9.4E+22	3.1E+23	—	6.5E+22
	B4Cペレット-被覆管間ギャップ *3 [直径] (mm)	0.9	1.0	2.6	0.7
照射特性	制御反応度 吸支 *4 (% $\Delta k/k'$ )	1ロッド スタック	4.5	2.8	—
	全数 挿入	炉停止余裕	1.9	0.1	0.5
		制御棒価値	—	—	0.2
		炉停止余裕	—	—	—
				1.3	0.8
				0.6	0.1
				—	—

\*1 不確か考慮

\*2 ミナル

\*3 寿命末期、燃交時

\*4 最終サイクルの初期 ( $^{10}\text{B}$ の燃焼を考慮)

図 8-1 大型金属燃料高出口温度型炉心の <sup>10</sup>B 濃縮度と制御棒価値の関係

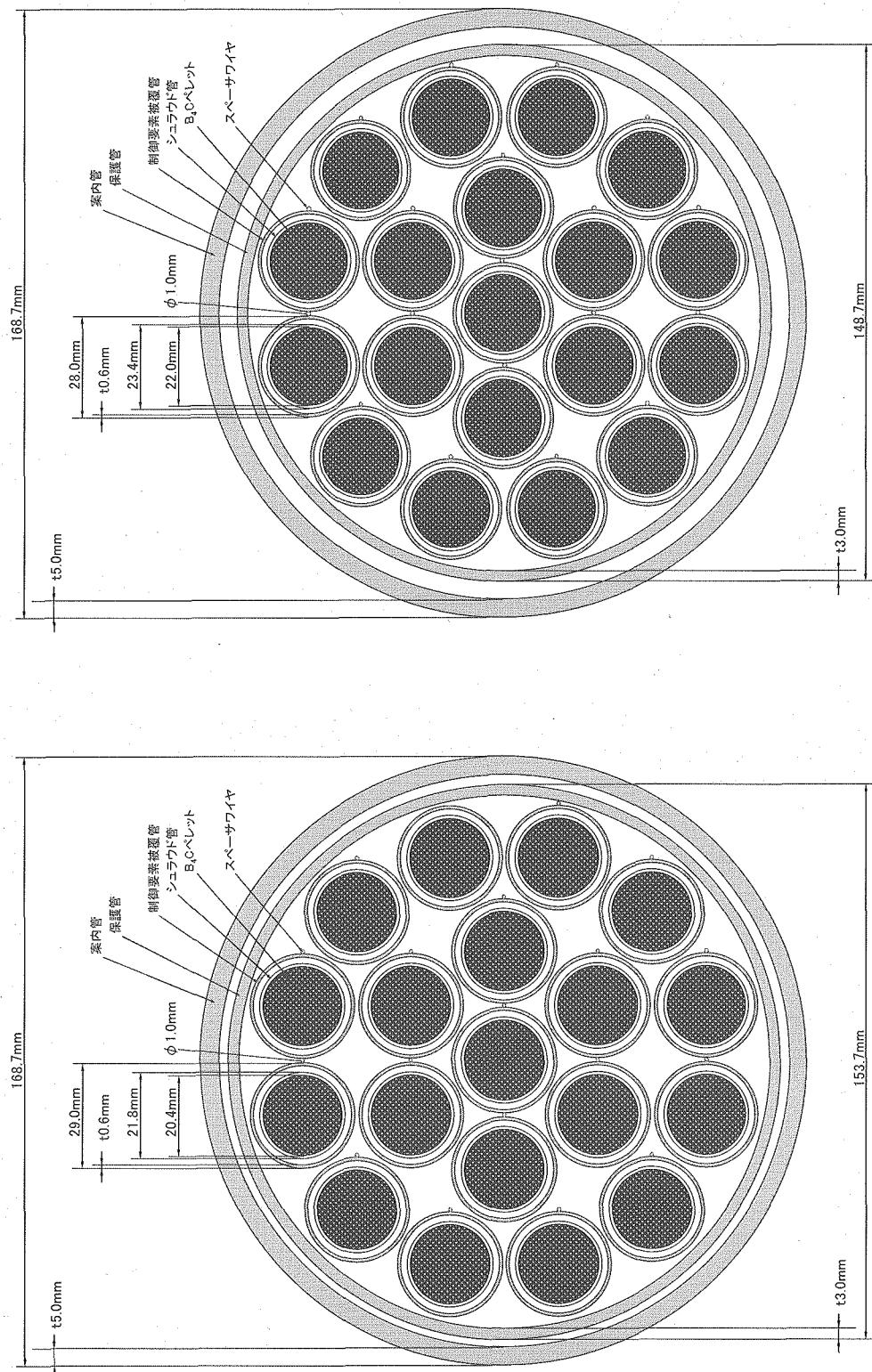


図 8-2 大型金属燃料高出口温度型炉心の長寿命化制御棒の概念図  
主炉停止系制御棒  
後備炉停止系制御棒

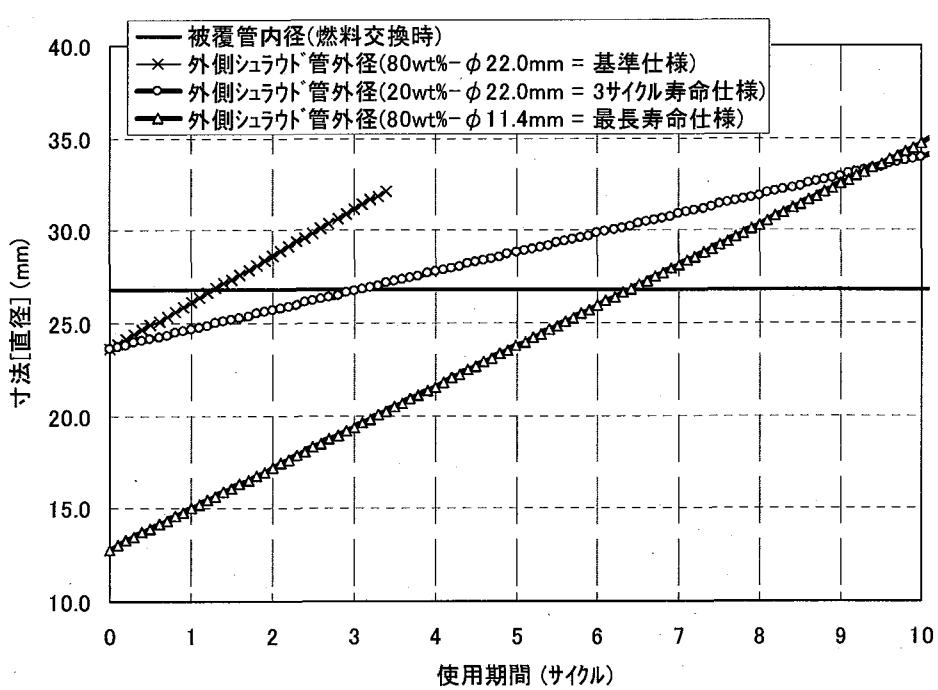
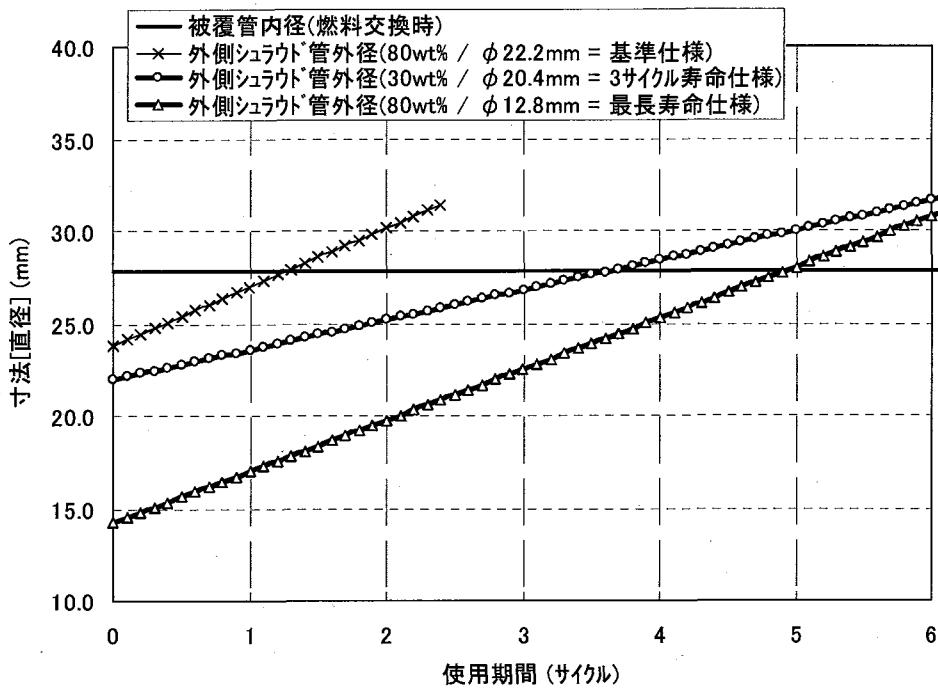


図 8-3 大型金属燃料高出口温度型炉心の制御棒外側シラウド管外径の経時変化

## 9. まとめ

革新的なナトリウム冷却金属燃料炉心概念として、出力分布の時間的変動を抑制することにより必要冷却材流量を最小化して原子炉出口温度を高め、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）を達成可能な「金属燃料高出口温度型炉心」の炉心・燃料設計検討を行った。大型（電気出力 1,500 MWe）及び中型（750 MWe）の金属燃料高出口温度型炉心について、前年度までの炉心検討結果を基に、遮へい体構成の見直しに伴う炉心仕様の変更、工学的安全係数の合理化検討とそれを用いた熱流力設計及び燃料健全性評価を行い、FS フェーズ II まとめとして ODS 鋼の高速中性子照射量目安値を満足する代表炉心を構築した。

構築した代表炉心は、炉心性能目標、制限条件、プラント設計との取合条件を満足する。中性子経済に優れる本炉心は、プランケット無しで平衡期炉心の増殖比 1.03 程度を達成し、若干の上部軸方向プランケットの付加（12~13 cm）により導入期炉心に必要な増殖比 1.1 程度を達成できる。これより、燃料サイクルコストに直接影響するプランケットを含んだ全炉心取出平均燃焼度については 83~99 GWd/t となり、炉心性能目標（60 GWd/t 程度以上）を大きく上回っている。

以上の高い原子炉出口温度、高い全炉心取出平均燃焼度に加えて、本炉心は長期運転サイクル（21.5~23.3 ヶ月）、小さな初装荷核分裂性 Pu 重量（4.0~4.7 t/GWe）を達成しており、FBR 実用化時代に求められる高い経済性の観点から優れた特性を有している。

工学的安全係数の合理化により、大型炉心は流量領域数 5 で、中型炉心は流量領域数 8 で、原子炉出口温度 550°C でも被覆管内面最高温度を 650°C 以下とすることが可能である見通しが得られた。また、CDF、被覆管周方向応力等より評価される燃料健全性についても成立の見通しを得た。今後、工学的安全係数の合理化をサポートするための実機データの蓄積・反映等が必要である。

本炉心の遮へい体構成は、径方向はステンレス鋼反射体 1 層と中性子遮へい能力に優れる Zr-H 遮へい体 2 層による構成とし、軸方向上部はガスプレナムとステンレス鋼遮へい体、軸方向下部はステンレス鋼遮へい体あるいはステンレス鋼遮へい体と B<sub>4</sub>C 遮へい体の組み合わせにより構成するものとした。中型平衡期炉心を対象に、炉心周りの構造物（炉心槽、上部炉心支持板、炉上部機構）の累積高速中性子照射量を評価した結果、いずれも制限条件に対して余裕のあることを確認した。これより、金属燃料高出口温度型炉心の遮へい設計成立性の見通しが得られた。

大型導入期炉心を対象に TRU 組成変動や高い増殖性能要求に対する核的な柔軟性を評価した。TRU 組成変動に関しては、軽水炉使用済燃料から回収した TRU 組成を複数ケース設定し、核特性への影響を調べた結果、ナトリウムボイド反応度の増加に対する炉心高さの減少といった炉心仕様の変更を必要とするものの、核的にはそれら TRU を受け入れ可能な範囲にあると判断される。また、世界を対象とした FBR 導入シナリオに適合する炉心の検討を行い、上部軸方向プランケットの延長と径方向プランケットの付加により、増殖比を 1.2~1.3 まで増加させる核的なポテンシャルを示すことができた。

さらなる高出口温度化をめざした検討として、制御棒位置偏差による出力歪みの解析を行い、燃料製作公差等からなる余剰反応度不確かさが合理化された場合の、工学的安全係数の出力分布誤差の低減効果を明らかにした。また、燃焼初期及び末期の制御棒挿入深度を反映した被覆管内面最高温度の低減化を検討し、燃焼末期の現実的な制御棒挿入深度の採用によって、わずかでは

あるが被覆管内面最高温度を低減できることがわかった。

燃料被覆管材料を現行の ODS 鋼から高温強度の低い PNC-FMS 鋼に変更した代替炉心についての検討を行い、炉心及び燃料仕様の変更により原子炉出口温度を 548℃が達成可能であるとの見通しを得た。

制御棒長寿命化の検討を行った結果、B<sub>4</sub>C ペレットの <sup>10</sup>B 濃縮度の低減、B<sub>4</sub>C ペレットの細径化により、寿命を燃料と同じ 3 サイクルとすることが可能な見通しを得た。ただし、B<sub>4</sub>C ペレットの燃焼度がスエリング式の適用範囲を超えることが今度の検討課題である。

### 謝辞

本金属燃料炉心の解析においては、(株)日立製作所 山館 恵氏、茨城日立情報サービス(株)黒澤 典史氏に解析作業(炉心・燃料設計、熱流力設計、燃料健全性等)を、(株)NESI 茂田 宏氏に計算作業を担当していただきました。上記の方々には、設計・評価作業全般について、厳しいスケジュールの中ご尽力いただきました。著者一同、深く謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 杉野 和輝, 他, 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, 核燃料サイクル開発機構 (2003).
- [2] 杉野 和輝, 他, 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－, JNC TN9400 2004-030, 核燃料サイクル開発機構 (2004).
- [3] 永沼 正行, 他, ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討(MOXおよび金属燃料炉心)－2004年度報告－, JNC TN9400 2005-051, 核燃料サイクル開発機構 (2005).
- [4] 丹羽 元, 他, 多様な炉心における炉心安全性の検討(1), JNC TN9400 2001-056, 核燃料サイクル開発機構 (2001).
- [5] 山館 恵, 他, ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討－酸化物燃料炉心－, JNC TN9400 2002-065, 核燃料サイクル開発機構 (2002).
- [6] G.L. Hofman and L.C. Walters, "Metallic Fast Reactor Fuels" in B.R.T. Frost, ed., *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment*, Part 1, Vol. 10A, VCH publishers, New York (1994).
- [7] 羽様 平, 他, 高速炉用統合炉定数ADJ2000Rの作成, JNC TN9400 2002-064, 核燃料サイクル開発機構 (2002).
- [8] S.K. Cheng and N.E. Todreas, "Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters," *Nucl. Eng. Design*, 92, 227 (1986).
- [9] 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, 核燃料サイクル開発機構 (2000).
- [10] 上平 明弘, 他, 高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS鋼)のスエリングおよび照射クリープ歪み特性の評価, JNC TN9400 99-022, 核燃料サイクル開発機構 (1999).
- [11] 早船 浩樹, 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技術検討書－(1)原子炉プラントシステム－, JAEA Research 2006-042, 日本原子力研究開発機構 (2006).
- [12] A. Hasegawa, N. Yamano, "The Standard Shielding Cross Section Library Based on JENDL-3.2," *Proc. of 9-th Int. Conf. on Radiation Shielding (ICRS-9)*, Tsukuba, Japan, p.723 (1999).
- [13] 庄野 彰, 他, 共同研究報告書 大型しゃへい実験に関する評価研究(VI)－JASPER実験解析による実証炉しゃへい設計への反映－(平成5年度), PNC TY9471 94-001, 動力炉・核燃料開発事業団 (1994).
- [14] 野村 茂雄, 他, 私信.
- [15] 上平 明弘, 他, 高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS鋼)のクリープ強度特性の評価, JNC TN9400 99-045, 核燃料サイクル開発機構 (1999).

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}$ <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1$ <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放熱	エントワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	フアード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$V/A$
コンダクタンス	シemens	S	$A/V$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリ	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	°C	$cd \cdot sr^{(c)}$
光束	ルーメン	lm	$1m^2 \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	$1m^2/m^2$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	$J/kg$
ギガ分与、カーマ			$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量			
方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	$J/kg$
人線量当量、組織線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	一モル	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
(比エネルギー)	一モル	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	一ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	一ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI接頭語

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

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) ln10(Np)$

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

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

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘルツ	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バーン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチルブ	sb	$1 sb=1cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位		$1X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nJ=10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr=(101325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101325 Pa$
力口リ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$