



ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討
(MOX 燃料炉心)
-2006 年度報告-

Study on Reactor Core and Fuel Design of Sodium Cooled Fast Reactor
(Mixed Oxide Fuel Core)
- Results in JFY2006 -

小川 隆 小林 登 大木 繁夫 永沼 正行
久保 重信* 水野 朋保

Takashi OGAWA, Noboru KOBAYASHI, Shigeo OHKI, Masayuki NAGANUMA
Shigenobu KUBO* and Tomoyasu MIZUNO

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

January 2008

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

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (MOX 燃料炉心)
— 2006 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
設計統括ユニット

小川 隆^{*}、小林 登、大木 繁夫、永沼 正行、久保 重信^{*}、水野 朋保

(2007 年 11 月 26 日受理)

高速増殖炉サイクル実用化研究開発の主概念であるナトリウム冷却炉大型 MOX 燃料高内部転換型炉心についての 2006 年度の炉心・燃料設計に関する検討結果を報告する。設計検討の成果を以下に示す。

(1) MA 含有燃料を用いた炉心の検討

高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズ II において構築した大型 MOX 燃料高内部転換型炉心を基に、MA 含有率の高い ALWR 使用済燃料の TRU を用いた炉心を構築した。本検討では、燃料重金属中の MA 含有率を 3 wt% と暫定、従来概略評価にとどめていた熱特性及び燃料健全性の詳細評価を行い、設計成立の見通しを得た。

構築した炉心は、Pu 富化度が内側炉心 19.6 wt%、外側炉心 22.1 wt% であり、増殖比は約 1.1 である。取出平均燃焼度は炉心部が 146 GWd/t、ブランケット燃料を含む全炉心が 93 GWd/t であり、いずれも設計条件を満足している。ナトリウムボイド反応度は 5.9 \$ であり設計目安を満足、制御反応度収支は主炉停止系制御棒、後備炉停止系制御棒ともに十分な炉停止余裕を持って成立の見通しである。

炉心流量領域は、内側及び外側炉心がそれぞれ 4 領域、径方向ブランケットが 2 領域の合計 10 領域である。被覆管肉厚中心温度の最高は 700°C、燃料ピンバンドル部圧力損失の最大は 0.22 MPa であり設計条件を満足している。また、被覆管の CDF (通常運転時) は最大が 0.45 であり設計条件を満足している。

(2) ブランケットへの Pu 添加による核不拡散性向上炉心の検討

高速増殖炉の内的 (intrinsic) な核不拡散性を向上させる一方策として、ブランケット燃料に炉心燃料用の Pu (あるいは TRU) を予め添加することにより、ブランケットにおける Pu を常に原子炉級以下 (²⁴⁰Pu 同位体組成比で > 18%) に保つ核不拡散性向上炉心を検討した。

本報告書には、電力会社 9 社、電源開発株式会社及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。

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

^{*} 日本原子力発電

上記(1)で構築した炉心を基に炉心設計検討を行い、ブランケットへの TRU 添加率を最大でも 5 wt%とすれば、軸方向ブランケット、径方向ブランケット共に、平均 Pu 組成を原子炉級に保つことができることを見出した。必要な炉心・燃料仕様の変更は、炉心平均比出力及び炉心部取出平均燃焼度の設計条件を満足させるための炉心高さの低減 (100→90 cm)、増殖比を 1.1 程度とするための軸方向ブランケットの伸長 (上下合わせて 35→55 cm) である。核特性、熱流力特性、被覆管 CDF について、いずれも設計条件を満足し、設計成立を見通すことのできることを確認した。

Study on Reactor Core and Fuel Design of Sodium Cooled Fast Reactor
(Mixed Oxide Fuel Core)
— Results in JFY2006 —

Takashi OGAWA^{*}, Noboru KOBAYASHI, Shigeo OHKI
Masayuki NAGANUMA, Shigenobu KUBO^{*} and Tomoyasu MIZUNO

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

(Received November 26, 2007)

The sodium-cooled large-scale “high internal conversion (HIC) type” core with MOX fuel is the most promising core concept in “Fast Reactor Cycle Technology Development” in Japan.

Design study on reactor core and fuel in JFY2006 is reported. The results of the study are summarized as follows:

(1) Design study of the core with MOX fuel containing MA

Based on the large-scale HIC type core with MOX fuel in “Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems” Phase II, we have developed a core using TRU of high MA content which is recovered from ALWR spent fuel. MA content in the fuel heavy metal is temporarily assumed to be 3 wt%. We have confirmed the core design feasibility with the detailed evaluations of thermal hydraulic characteristics and fuel integrity. Those characteristics were evaluated preliminarily in the previous studies.

Plutonium enrichment of the core is 19.6 wt%, 22.1 wt% for inner and outer cores, respectively. Breeding ratio is about 1.1. Core average discharge burnup is 146 GWd/t. Total average discharge burnup (including blankets) is 93 GWd/t. Each of them meets the design condition. The sodium void reactivity of 5.9 \$ satisfies the safety requirement. Sufficient control reactivity balance can be foreseen for the primary and the backup systems with enough shutdown margins.

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”.

^{*} Collaborating Engineer

* The Japan Atomic Power Company

The core has 10 coolant flow regions; 4 for inner and outer cores each and 2 for radial blanket. The maximum cladding inner-wall temperature is 700 °C, and the maximum pressure drop of fuel pin bundle is 0.22 MPa; those satisfy the design limits. The maximum cladding CDF value (for steady state) is 0.45, which also satisfies the design limit.

(2) Design study of the nonproliferation core by adding Pu to the blankets

As one of the measures to enhance the intrinsic nonproliferation property of fast reactors, we have investigated the nonproliferation core that can keep the Pu in blankets to “Reactor Grade (^{240}Pu isotope abundance ratio > 18%)” with premixing Pu (or TRU) of core fuel to blanket fuel.

Based on the core developed in (1), we have performed core design study. It is found that the average Pu compositions for both axial and radial blankets can always be Reactor Grade, providing 5 wt% of TRU content in the blankets at a maximum. Necessary changes in core and fuel specifications are

- the reduction of core height (100→90 cm) in order to satisfy the design conditions for core average specific power and core average discharge burnup,
- the extension of axial blanket (35→55 cm: total of upper and lower ones) for the breeding ratio of about 1.1.

All of the core neutronic characteristics, the thermal-hydraulic characteristics, and the cladding CDF value satisfy the design limits and conditions, therefore we have confirmed the feasibility of the nonproliferation core design.

Keywords:

Fast Reactor Cycle Technology Development, Sodium Cooled Fast Reactor, Mixed Oxide Fuel Core, Core and Fuel Design, Minor Actinide, Nuclear Nonproliferation

目 次

1. はじめに	1
2. MA含有燃料を用いた炉心の検討	2
2.1 検討条件	2
2.2 炉心・燃料仕様の検討	3
2.3 炉心特性評価	4
2.3.1 核特性評価	4
2.3.2 熱流力特性評価	6
2.3.3 燃料健全性評価	8
2.4 まとめ	9
3. ブランケットへのPu添加による核不拡散性向上炉心の検討.....	32
3.1 背景	32
3.2 検討条件	32
3.3 炉心特性評価	35
3.3.1 核特性評価	35
3.3.2 熱流力特性・燃料健全性評価	36
3.3.3 遮へい設計成立性の見通し	38
3.4 まとめ	40
4. おわりに	61
謝辞	62
参考文献	63

Contents

1. Introduction	1
2. Design study of the core with MOX fuel containing MA	2
2.1 Design condition	2
2.2 Study of core and fuel specifications	3
2.3 Core characteristics evaluation	4
2.3.1 Core neutronic evaluation	4
2.3.2 Thermal hydraulic evaluation	6
2.3.3 Fuel integrity evaluation	8
2.4 Summary	9
3. Design study of the nonproliferation core by adding Pu to the blankets	32
3.1 Background	32
3.2 Design condition	32
3.3 Core characteristics evaluation	35
3.3.1 Core neutronic evaluation	35
3.3.2 Thermal hydraulic and fuel integrity evaluations	36
3.3.3 Shielding design prospect	38
3.4 Summary	40
4. Concluding remarks	61
Acknowledgement	62
References	63

表リスト

表 2-1	設計検討条件(FBR 導入期炉心)	10
表 2-2	核設計検討用軽水炉使用済燃料 TRU 組成	11
表 2-3	炉心仕様のサーベイ計算結果	12
表 2-4	炉心・燃料仕様	13
表 2-5	主要核特性	14
表 2-6	燃料インベントリ	15
表 2-7	制御棒価値	17
表 2-8	制御反応度収支	18
表 2-9	反応度特性 (平衡サイクル末期 定格出力時)	19
表 2-10	温度係数 (平衡サイクル末期 定格出力時)	19
表 2-11	動特性パラメータ (平衡サイクル末期)	20
表 2-12	炉心流量配分と熱流力特性及び被覆管 CDF	21
表 3-1	主要核特性	41
表 3-2	燃料インベントリ [核不拡散性向上炉心]	42
表 3-3	制御棒価値 [核不拡散性向上炉心]	44
表 3-4	制御反応度収支 [核不拡散性向上炉心]	45
表 3-5	反応度特性 (平衡サイクル末期 定格出力時) [核不拡散性向上炉心]	46
表 3-6	温度係数 (平衡サイクル末期 定格出力時) [核不拡散性向上炉心]	47
表 3-7	動特性パラメータ (平衡サイクル末期) [核不拡散性向上炉心]	48
表 3-8	燃料仕様 [核不拡散性向上炉心]	49
表 3-9	炉心流量配分と熱流力特性及び被覆管 CDF [核不拡散性向上炉心]	50
表 3-10	径方向ブランケット外側での中性子束の比較 (炉心中心高さ位置)	51
表 3-11	下部軸方向ブランケット下端での中性子束の比較	51
表 3-12	上部軸方向ブランケット上端での中性子束の比較	52

図リスト

図 2-1	炉心配置	22
図 2-2	核設計検討用軽水炉使用済燃料 TRU 組成	23
図 2-3	燃焼チェーン	24
図 2-4	炉心高さとなトリムポイド反応度及びドップラ係数の関係	25
図 2-5	炉心高さとなトリムポイド反応度／ドップラ係数比の関係	25
図 2-6	燃料交換パターン	26
図 2-7	制御棒値が最小となるスタック制御棒位置	27
図 2-8	燃料集合体必要最少流量の度数分布	28
図 2-9	炉心流量領域区分	29
図 2-10	CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴	30
図 2-11	燃料ピンの被覆管最高温度(肉厚中心)履歴	31
図 3-1	ブランケットへの TRU 添加による取出 Pu 同位体組成の変化	53
図 3-2	燃料集合体必要最少流量の度数分布 [核不拡散性向上炉心]	54
図 3-3	炉心流量領域区分 [核不拡散性向上炉心]	55
図 3-4	CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴 [核不拡散性向上炉心]	56
図 3-5	燃料ピンの被覆管最高温度(肉厚中心)履歴 [核不拡散性向上炉心]	57
図 3-6	フェーズ II 代表炉心の炉心周り遮へい検討結果	58
図 3-7	径方向高速中性子束分布の比較 (下部軸方向ブランケット下端、0.1MeV 以上)	59
図 3-8	径方向高速中性子束分布の比較 (上部軸方向ブランケット上端、0.1MeV 以上)	60

1. はじめに

高速増殖炉サイクル実用化研究開発（以下、FaCT と記す）の主概念であるナトリウム冷却炉大型 MOX 燃料高内部転換型炉心に関する設計検討として、本年度（2006 年度）は FaCT の設計要求として挙げられる「廃棄物管理性」と「核不拡散性」の炉心・燃料設計に係る対応について検討した。具体的には、高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究（以下、FS と記す）フェーズⅡにおいて構築したナトリウム冷却炉大型 MOX 燃料高内部転換型炉心を基に、「MA*含有燃料を用いた炉心」と「ブランケットへの Pu 添加による核不拡散性向上炉心」の検討を行った。

* MA: Minor Actinide (マイナーアクチニド) …原子量 89 から 103 までのアクチニド系列元素のうち、原子炉燃料の燃焼とともに生成される少量の元素群の総称。代表的な元素は、Np (ネプツニウム)、Am (アメリシウム)、Cm (キュリウム)。

2. MA 含有燃料を用いた炉心の検討

FS フェーズⅡにおいて構築した大型 MOX 燃料高内部転換型炉心を基に、MA 含有率の高い軽水炉使用済燃料の TRU*1 を用いた炉心の検討を行った。

2.1 検討条件

表 2-1 に、本検討に用いたプラント仕様、炉心・燃料基本仕様、燃料健全性及び安全設計に係る設計目安、他設計との取合条件、炉心性能の目標を示す。

表 2-1 において、大型炉のプラント仕様に関する設計条件としては、炉心熱出力が 3,530 MWt、原子炉出口及び入口温度が 550°C 及び 395°C、一次冷却材流量が 18,000 kg/s である。

炉心・燃料の基本仕様は、FS フェーズⅡの大型高内部転換型炉心（FBR 導入期炉心）¹⁾と同一であり、燃料形態が MOX、炉心型式が均質 2 領域炉心、再臨界回避方策が改良内部ダクト型燃料集合体であり、炉心配置は図 2-1 に示すとおりである。

燃料の TRU は、ALWR*2 使用済燃料から回収した TRU（ABWR, APWR 平均組成）であり、炉外時間は 40 年である²⁾。この TRU 組成は、FBR 導入シナリオの検討結果を基に、安全性に係る反応度係数（ボイド反応度、ドップラ係数）への影響を包絡するものとして設定されている。燃料重金属の MA 含有率は 3 wt%、FP 混入率は 0.6 vol% を暫定した。表 2-2 及び図 2-2 に本検討に用いた TRU 組成を示す。

炉心材料は被覆管が ODS 鋼、ラップ管が PNC-FMS 鋼である。

設計目安としては、ULOF*3 起因過程における即発臨界回避のための安全要求であるナトリウムボイド反応度 6 \$ 程度以下、炉心高さ 100 cm 程度以下、炉心平均比出力 40 kW/kg-MOX 程度以上と、燃料健全性確保のための条件である最大線出力 430 W/cm 以下、高速中性子照射量 5×10^{23} n/cm² 以下、被覆管最高温度（肉厚中心）700°C 以下、通常運転時の CDF*4 0.5 以下がある。

燃料製造及びプラント設計との取合条件としては、燃料のスミア密度が炉心 82%、ブランケット 90%、燃料バンドル部の圧損が 0.2 MPa 程度以下であり、遮へい体外接円径は

*1 TRU: transuranic (超ウラン) の略。ウランよりも原子番号の大きい元素である Np, Pu, Am, Cm 等を指す。本研究では Pu と MA の総称として用いる。

*2 ALWR: Advanced Light Water Reactor …高燃焼度の新型軽水炉

*3 ULOF: Unprotected Loss of Flow …流量喪失型スクラム失敗事象

*4 CDF: Cumulative Damage Fraction …累積損傷和

6.8 m 以下となっている。

炉心性能の目標としては、増殖比が 1.1 程度、取出平均燃焼度は、炉心部が 150 GWd/t 程度であり、全炉心平均（ブランケット燃料を含む）は 80 GWd/t 程度以上、運転サイクル長さは 18 ヶ月以上を暫定している。

2.2 炉心・燃料仕様の検討

FS では、高速炉多重リサイクル TRU 組成を設計標準として炉心・燃料の設計検討を行うとともに、MA 含有率の高い軽水炉使用済燃料回収 TRU の代表的な組成を用いた核特性への影響検討を行った。ここで、MA 含有率の高い TRU を用いることの核特性への影響としては、ナトリウムボイド反応度の増加、ドップラ係数の絶対値の減少及び実効遅発中性子割合の減少が挙げられ、その度合いによっては ULOF 時の SASS*有効性確保等に影響が及ぶことになる。このことから、ナトリウムボイド反応度及びドップラ係数の絶対値への影響が少ない炉心・燃料仕様を選定するために炉心高さをパラメータとしたサーベイ検討を行った。

(1) 解析評価手法

炉心・燃料仕様の検討に用いた核特性解析評価手法を以下に示す。

(i) 炉定数

炉定数は、統合炉定数 ADJ2000R を用いた。

(ii) 燃焼・出力分布特性

燃焼・出力分布特性は、2次元 RZ 体系 70 群の拡散・燃焼計算により求めた。なお、燃焼チェーンは燃料の MA 含有率が高いことに考慮した詳細モデル（図 2-3 参照）を用いた。平衡サイクルは、燃料交換バッチ数に 2 サイクル加えた最後のサイクルとし、Pu 富化度は、平衡サイクル末期において 0.2% $\Delta k/kk'$ の運転余裕を確保するように設定した。また、最大線出力は、計算値に対してラッパ管の発熱 (0.6%) を除き、燃料ペレットの軸方向伸び (1.2%) を考慮した値を評価値とした。

(iii) ナトリウムボイド反応度、ドップラ係数及び動特性パラメータ

ナトリウムボイド反応度及びドップラ係数は、前記(ii)項の平衡サイクル末期を対象に 2次元 RZ 体系 70 群の拡散計算により求めた。なお、ナトリウムボイド反応度は、非均質効果 0.87 と輸送・メッシュ効果 0.99 を補正した値を評価値とし、ド

* SASS: Self Actuated Shutdown System (自己作動型炉停止機構)

ップラ係数は、非均質効果 1.05 を補正した値を評価値とした。遅発中性子割合は 70 群の摂動計算により求めた。

(2) 検討結果

表 2-3 に、炉心高さをパラメータとした核特性解析結果を示す。炉心高さは FS フェーズ II の代表炉心と同じ 100 cm を基準として、90 cm 及び 80 cm に短縮した 3 ケースとした。炉心高さ 100 cm 及び 90 cm のケースは燃料ピン径が 10.4 mm、集合体の燃料ピン本数が 255 本であり、炉心高さ 80 cm のケースは最大線出力が設計目安を満足するように、集合体の燃料ピン本数を 315 本とし、燃料ピン径を 9.3 mm としている。

図 2-4 に、炉心高さとナトリウムボイド反応度及びドップラ係数の関係を示す。図 2-4 において、炉心高さを 100 cm、90 cm 及び 80 cm としたケースのナトリウムボイド反応度は何れも設計目安である 6\$ 程度以下を満足している。また、炉心高さを 80 cm と 90 cm としたケースのナトリウムボイド反応度は同等であり、炉心高さを 100 cm としたケースより約 0.2 \$ 低い値となっている。ドップラ係数の絶対値は、炉心高さを 100 cm としたケースが最も大きく炉心高さの短縮に伴い減少している。

図 2-5 に、ナトリウムボイド反応度とドップラ係数の比を ULOF 時の SASS 有効性確保に対する優劣の指標として、炉心高さとの関係を示す。図 2-5 において、炉心高さを 100 cm と 90 cm としたケースのナトリウムボイド反応度とドップラ係数の比の絶対値はほぼ同等であり、炉心高さを 80 cm としたケースより約 8% 低く ULOF 時の SASS 有効性確保に有利なものとなっている。ここで、炉心高さを 100 cm と 90 cm としたケースの燃焼特性を比較すると、炉心高さを 100 cm としたケースは 90 cm としたケースに比較して運転サイクル長さが長く、ブランケット燃料を含む全炉心燃焼度が高く、燃焼反応度が小さい特性を示している。このことから、炉心・燃料仕様として、炉心高さ 100 cm、燃料ピン径 10.4 mm を選択することとした。

表 2-4 に、選定した炉心の基本仕様と炉心及び径方向ブランケット燃料集合体の主要仕様を示す。

2.3 炉心特性評価

2.3.1 核特性評価

前記 2.2 項で選定した炉心・燃料仕様を基に、燃焼特性、出力分布、制御反応度収支、

反応度係数等を評価した。

(1) 解析評価手法

(i) 炉定数

炉定数は、統合炉定数 ADJ2000R を用いた。

(ii) 燃焼及び出力分布特性

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 3 次元三角コーナメッシュ体系 7 群の拡散・燃焼計算により行った。燃焼チェーンは燃料の MA 含有率が高いことに考慮した詳細モデル (図 2-3 参照) を用いた。

Pu 富化度は、平衡サイクル末期において $0.2\% \Delta k/k'$ の運転余裕を確保するように設定した。

燃焼計算は、燃料交換バッチ数の 2 倍のサイクル数について行い後半を平衡サイクルとした。なお、最大線出力は、計算で得られた値に対して、ラッパ管の発熱 (0.6%) を除き、燃料ペレットの軸方向伸び (1.2%) を考慮して評価した。

(iii) 制御棒価値

制御棒価値は、上記(ii)項の 3 次元燃焼計算における平衡サイクル初期で評価した。制御棒価値は、解析値に対して群縮約効果 0.97、非均質効果 0.89、輸送効果 0.96、メッシュ効果 0.93 を補正した値をノミナルとし、不確かさ 9% (3σ) を考慮した値を評価値とした。

(iv) 反応度係数及び動特性パラメータ

ナトリウムボイド反応度及びドップラ係数は、前記(ii)項で求めた平衡サイクル末期の燃料組成を基に、ナトリウムボイド反応度は厳密摂動計算、ドップラ係数は 1 次摂動計算により求めた。また、ナトリウムボイド反応度は、非均質効果 0.87 と輸送・メッシュ効果 0.99 を補正した値を評価値とし、ドップラ係数は、非均質効果 1.05 を補正した値を評価値とした。遅発中性子割合は 70 群の摂動計算により求めた。

(2) 評価結果

(i) 主要核特性

表 2-5 及び表 2-6 に主要核特性及び燃料インベントリを示し、図 2-6 には燃焼計算に用いた燃料交換パターンを示す。

Pu 富化度は、内側炉心が 19.6 wt%、外側炉心が 22.1 wt%であり、燃焼反応度は

1.8% $\Delta k/k'$ である。増殖比は 1.097 であり、表 2-6 の燃料インベントリを基に求めた原子炉倍増時間は 75 年、複合システム倍増時間は 85 年である。

最大線出力は内側炉心が 411 W/cm、外側炉心が 395 W/cm、取出平均燃焼度は炉心部が 146 GWd/t、ブランケット燃料を含む全炉心が 93 GWd/t、高速中性子照射量は $5.0 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ であり、いずれも設計条件を満足している。

ナトリウムボイド反応度は 5.9 \$ であり設計目安の 6 \$ 程度以下を満足している。また、ドップラ係数は $-4.5 \times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$ である。

(ii) 制御棒価値及び制御反応度収支

表 2-7 に制御棒価値を示し、表 2-8 には制御反応度収支を示す。表 2-8 において、主炉停止系制御棒、後備炉停止系制御棒ともに十分な炉停止余裕を有している。なお、図 2-7 には、ワンロードスタック時の制御棒価値が最小になるスタック制御棒位置を示す。

(iii) 反応度及び動特性パラメータ

表 2-9 に、平衡サイクル末期における内側炉心及び外側炉心のナトリウムボイド反応度、ドップラ係数、密度係数及び形状係数を示し、表 2-10 には、温度係数を示す。

表 2-11 に、動特性パラメータ（実効遅発中性子割合、遅発中性子先行核の崩壊定数、即発中性子寿命）を示す。

2.3.2 熱流力特性評価

前記 2.2 項で選定した炉心・燃料仕様と前記 2.3.1 項で評価した出力分布を基に、炉心流量配分領域区分を設定し、燃料集合体の熱流力特性を評価した。

(1) 評価条件

(i) 設計条件

炉心流量配分設定に係る設計条件を以下に示す。

- ・被覆管肉厚中心温度 700°C 以下
- ・燃料ピンバンドル部圧力損失 0.2 MPa 程度以下

(ii) 炉心及び径方向ブランケットへの配分流量

炉心及び径方向ブランケット燃料、制御棒、径方向遮へい体への配分流量とリーク流量は下記のとおりとした。

- ・炉心及び径方向ブランケット燃料 . . . 95.5 %
- ・制御棒及び径方向遮へい体 . . . 2.5 %
- ・リーク流量 . . . 2.0 %

(iii) 出力分布

燃料集合体出力は、前記 2.3.1 項で求めた 3 次元出力分布を用い、燃料ピン出力は、集合体内出力分布の低出力側コーナ部に内部ダクトが存在するものとして評価した値を用いた。なお、径方向ブランケット燃料集合体については、ガンマ線発熱効果としてファクタ 1.09 を乗じた積分出力を用いた。

(2) 評価方法

(i) 被覆管最高温度

被覆管最高温度は、集合体の周辺流れ効果を考慮した単ピン伝熱解析によりノミナル値を求め、工学的安全係数を用いてホットスポット値を評価した。

評価に用いた周辺流れ効果係数と工学的安全係数を以下に示す。

(a) 周辺流れ効果係数

燃料集合体の周辺流れ効果係数は、2004 年度の集合体内熱流動特性評価結果^[3]に基づく下記の値を用いた。

- ・炉心燃料集合体 1.12
- ・径方向ブランケット燃料集合体 1.13

(b) 工学的安全係数

燃料集合体の被覆管ホットスポット温度評価に用いる工学的安全係数は、電力実証炉の設計に適用した下記の値を用いた。

- ・炉心燃料集合体 1.26
- ・径方向ブランケット燃料集合体 1.37

(ii) 燃料ピンバンドル部圧力損失

燃料ピンバンドル部圧力損失は、2004 年度の集合体内熱流動特性評価結果^[3]に基づく近似式を用いて算定した。

(3) 評価結果

(i) 炉心流量領域区分

図 2-8 に、被覆管肉厚中心最高温度を 700°C とするための集合体必要最少流量の度数分布を内側炉心、外側炉心及び径方向ブランケット燃料の領域毎に示す。図 2-8

の集合体必要最少流量の度数分布を基に、炉心・径方向ブランケット燃料への配分流量の低減と流量領域区分の対称性を考慮して流量流域区分を設定した。図 2-9 に、設定した炉心流量領域区分を示す。炉心流量領域は、内側及び外側炉心がそれぞれ 4 領域、径方向ブランケットが 2 領域である。

(ii) 炉心流量配分及び熱流力特性

表 2-12 に、炉心各流量領域の燃料集合体流量、領域流量、被覆管最高温度及び燃料ピンバンドル部圧力損失を示す。なお、内側炉心の第 1 から第 3 流量領域の燃料集合体流量は、後述の被覆管の CDF を抑制するために被覆管肉厚中心最高温度を 690℃とするように設定し、それ以外の領域の燃料集合体流量は、被覆管肉厚中心最高温度を 700℃とするように設定した。

表 2-12 において、被覆管肉厚中心最高温度及び燃料ピンバンドル部圧力損失の最大は 700℃及び 0.22 MPa であり設計条件を満足している。また、炉心及び径方向ブランケット燃料への流量は 16,756 kg/s（1 次系冷却材流量の 93.1%）であり、炉心に配分可能な流量 95.5%に対して 2.4%の余裕を有している。

2.3.3 燃料健全性評価

前記 2.2 項で選定した燃料仕様と前記 2.3.1 項及び 2.3.2 項で評価した燃料ピン出力及び被覆管温度の履歴を基に、燃料健全性に係る主要評価項目である被覆管の CDF を評価した。

(1) 評価条件

(i) 設計条件

CDF : 0.5 以下（通常運転時）

(ii) 燃料ピン出力及び被覆管温度履歴

図 2-10 及び図 2-11 に、CDF 評価対象とした燃料ピンの出力及び被覆管肉厚中心温度履歴を示す。

(2) 評価方法

被覆管の CDF は、統計処理を適用した手法で評価した。評価に用いた被覆管の材料強度式は以下のとおりである。

- ・クリープ強度：ODS 鋼クリープ破断強度式^[4]
- ・内面腐食式：ODS 鋼暫定評価式^[4]

・外面腐食式：ODS 鋼暫定評価式^[4]

(3) 評価結果

表 2-12 に、被覆管の CDF（通常運転時）評価結果を示す。表 2-12 において、CDF の最大は内側炉心が 0.45、外側炉心が 0.06 であり、いずれも設計条件（0.5 以下）を満足している。

2.4 まとめ

FS フェーズ II において構築した大型 MOX 燃料高内部転換型炉心を基に、MA 含有率の高い ALWR 使用済燃料の TRU を用いた炉心の検討を行った。本検討では、燃料重金属の MA 含有率を 3 wt% と暫定し、炉心高さ及び燃料ピン径をパラメータとした核特性評価に基づく炉心・燃料仕様の選定、選定炉心の核・熱特性及び燃料健全性評価を行った。炉心・燃料仕様の FS フェーズ II の大型 MOX 燃料高内部転換型炉心からの変更は、MA 含有率の増加に伴う増殖性能の向上に対応した上部軸方向ブランケットの 5 cm 短縮と He ガス生成量の増加に対応したと下部ガスプレナム長さの 5 cm 伸長のみである。

選定炉心は、Pu 富化度が内側炉心が 19.6 wt%、外側炉心が 22.1 wt% であり、増殖比が約 1.1 である。取出平均燃焼度は炉心部が 146 GWd/t、ブランケット燃料を含む全炉心が 93 GWd/t、高速中性子照射量は 5.0×10^{23} n/cm²・s であり、いずれも設計条件を満足している。最大線出力は内側炉心が 411 W/cm、外側炉心が 395 W/cm、ナトリウムボイド反応度は 5.9 \$ であり設計目安を満足している。また、制御反応度収支は主炉停止系制御棒、後備炉停止系制御棒ともに十分な炉停止余裕を持って成立の見通しである。

炉心流量領域は、内側及び外側炉心がそれぞれ 4 領域、径方向ブランケットが 2 領域の合計 10 領域である。被覆管肉厚中心温度の最高は 700℃、燃料ピンバンドル部圧力損失の最大は 0.22 MPa であり設計条件を満足している。また、炉心及び径方向ブランケット燃料への流量は 16,756 kg/s（1 次系冷却材流量の 93.1%）であり、炉心に配分可能な流量 95.5% に対して 2.4% の余裕を有している。

被覆管の CDF（通常運転時）は内側炉心の最大が 0.45、外側炉心の最大が 0.06 であり、いずれも設計条件を満足している。

表 2-1 設計検討条件 (FBR 導入期炉心)

項 目		フェース II 代表炉心	本検討	
プラント仕様	電気出力	1,500MWe	←	
	炉心熱出力	3,570MWt	3,530MWt	
	原子炉出口/入口温度	550 / 395 °C	←	
	1次系流量	18,200kg/s	18,000kg/s	
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	MOX	←	
	炉心型式	均質2領域	←	
	再臨界回避方策	改良内部炉外型集合体	←	
	炉心配置	図2-1 *1	←	
	集合体配列ピッチ	206.0mm	←	
	遮へい体外接円径	6.77m	←	
	燃料	TRU組成	高速炉多重リサイクルTRU	軽水炉使用済燃料TRU (表2-2, 図2-2参照)
		MA含有率	—	3 wt%-HM 【暫定】
FP混入率		0.2Vol%	0.6Vol% 【暫定】	
炉心材料 *2	被覆管	ODS鋼	←	
	フラッシュ管	PNC-FMS鋼	←	
設計目安	安全要求	トリウムイットリウム反応度	6\$程度以下*3	←
		炉心高さ	100cm程度以下*3	←
		炉心平均比出力	40kW/kg-MOX程度以上*3	←
	燃料健全性	最大線出力	430W/cm程度以下	←
		高速中性子照射量 *4	5×10^{23} n/cm ² 以下	←
		被覆管最高温度 [肉厚中心]	700°C 以下	←
	CDF [通常運転時]	0.5 以下	←	
取合条件	燃料スミア密度	炉心	82%TD	←
		ブランケット	90%TD	←
	燃料ハンドリング部圧損	0.2MPa程度以下	←	
	遮へい体外接円径	6.8m 以下	←	
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応	←	
炉心性能目標	増殖比	1.1 程度	←	
	取出平均燃焼度	炉心部	150GWd/t 程度	←
		全炉心 *5	60GWd/t 程度以上	80GWd/t 程度以上 【暫定】
	運転サイクル長さ	18ヶ月 以上	18ヶ月 程度以上 【暫定】	

*1 切込み付きUIS対応制御棒、SASS配置

*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 炉心損傷事象の起因過程における即発臨界回避

*4 $E > 0.1\text{MeV}$

*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 核設計検討用軽水炉使用済燃料 TRU 組成

核 種	組成 (wt%)	
Pu, Np	Pu-238	2.8
	Pu-239	50.0
	Pu-240	27.3
	Pu-241	1.8
	Pu-242	9.2
	Np-237	8.9
	合計	100.0
Am, Cm	Am-241	83.4
	Am-242m	0.1
	Am-243	14.9
	Cm-244	1.2
	Cm-245	0.4
	合計	100.0

表 2-3 炉心仕様のサーベイ計算結果

項 目	単 位	FS フェーズ II 代表炉心 〔高速炉多重 リサイクルTRU〕	軽水炉使用済燃料TRU				
			255t ^レ ンパント ^ル		315t ^レ ンパント ^ル		
			炉心高さ 100cm	炉心高さ 90cm	炉心高さ 80cm		
炉心基本仕様	炉心熱出力	MWt	3,570	3,530	←	←	
	運転サイクル長さ	ヶ月	26.3	←	24.0	21.4	
	燃交バッチ数 (炉心/径 ^ラ ランケット)	—	4/4	←	←	4/4	
	炉心高さ	cm	100	←	90	80	
	軸ブランケット厚さ(上部/下部)	cm	20/20	15/20	20/20	20/25	
	炉心燃料ピン径	mm	10.4	←	←	9.3	
	炉心燃料集合体ピン本数	本	255	←	←	315	
	炉心燃料体数(内側/外側/合計)	体	288/274/562	←	←	←	
	径方向ブランケット燃料体数	体	96	←	←	←	
	制御棒本数 (主系/後備系/合計)	本	57(40/17)	←	←	←	
	径方向遮へい体数 (ステンレス鋼/Zr-H)	体	102/108	←	←	←	
	炉心等価直径	m	5.38	←	←	←	
	遮へい体外接円径	m	6.77	←	←	←	
	炉心部体積比	燃料	%	43.9	←	←	43.3
		構造材	%	25.8	←	←	25.8
冷却材		%	30.3	←	←	30.9	
(t ^レ ンパント ^ル 部)		%	(22.0)	←	←	(23.5)	
核特性	Pu富化度 [Pu/HM] (内側/外側)	wt%	18.5/21.0	19.5/22.1	20.5/23.2	22.2/25.0	
	MA含有率 [MA/HM] (内側/外側)	wt%	0.9/1.0	3.0/3.0	3.0/3.0	3.0/3.0	
	燃焼反応度	%Δk/kk'	2.5	1.7	2.0	2.5	
	増殖比(サイクル平均)	—	1.10	1.10	1.11	1.10	
	出力分担率(炉心/軸 ^ラ 径 ^ラ)	%	92.9/5.7/1.5	93.4/5.2/1.4	92.4/6.2/1.4	91.1/7.5/1.4	
	最大高速中性子束 (E > 0.1MeV)	×10 ¹⁵ n/cm ² ・s	1.8	1.8	1.9	2.0	
	最大高速中性子照射量 (E > 0.1MeV)	×10 ²³ n/cm ²	5.0	5.0	4.8	4.6	
	最大線出力* ¹ (内側/外側)	W/cm	406/392	404/386	438/422	408/418	
	取出平均燃焼度	炉心	GWd/t	148	147	148	148
		全炉心* ²	GWd/t	90	93	88	82
	炉心平均比出力	kW/kg-MOX	41	41	51	50	
	初装荷Pu-f重量	t/GWe	5.8	5.6	5.3	5.0	
	原子炉倍増時間	年	67	70	58	63	
	複合システム倍増時間* ³	年	76	79	71	77	
	ナトリウムボイド反応度* ⁴	\$	5.0	5.7	5.5	5.5	
	ドップラ係数	Tdk/dT	-5.7E-03	-4.5E-03	-4.3E-03	-4.0E-03	
実効遅発中性子割合	—	3.31E-03	3.18E-03	3.18E-03	3.17E-03		

*¹ ラップ管発熱(0.6%)、燃料膨張効果(1.2%)を考慮

*² ブランケット燃料を含む燃焼度

*³ 燃料交換・定検期間=45日、冷却期間5年

*⁴ ラップ管間ギャップ及び内部ダクト内の冷却材は非ボイド

表 2-4 炉心・燃料仕様

項 目		フェーズ II 代表炉心 (高速炉多重サイクルTRU)	本検討 (軽水炉使用済燃料TRU)		
炉心基本仕様	炉心熱出力 (MWt)	3,570	3,530		
	炉心型式	均質 2 領域炉心	←		
	再臨界回避方策	改良内部ダクト型集合体	←		
	運転サイクル長さ (ヶ月)	26.3 [800日]	←		
	燃料交換バッチ数 [炉心/径方向ブランケット]	4 / 4	←		
	炉心材料 [被覆管/ラッパ管]	ODS鋼 / PNC-FMS鋼	←		
	炉心等価直径 (cm)	538	←		
	遮へい体外接円径 (m)	6.77	←		
	炉心燃料集合体数 [内側炉心/外側炉心/合計]	288 / 274 / 562	←		
	径方向ブランケット燃料集合体数	96	←		
	制御棒本数 [主炉停止系/後備炉停止系]	40 / 17	←		
	径方向遮へい体数 [ステンレス鋼/Zr-H]	102 / 108	←		
	集合体配列ピッチ (mm)	206.0	←		
	燃料仕様	炉心燃料集合体	燃料形態	MOX (ペレット型)	←
燃料スタック長さ (mm)			炉心	1,000	←
			ブランケット[上部/下部]	200 / 200	150 / 200
燃料ピッチ外径 (mm)			10.4	←	
被覆管肉厚 (mm)			0.71	←	
燃料スミ密度 [炉心/軸ブランケット] (%TD)			82 / 90	←	
スペーサ径 (mm)			1.03	←	
ガスブレナム長さ [上部/下部] (mm)			100 / 1,100	100 / 1,150	
燃料ピッチ全長 (mm)			2,690	2,690	
燃料ピッチ本数			255	←	
燃料ピッチ配列ピッチ (mm)			11.48	←	
内部ダクト外面辺の長さ (mm)			46.0	←	
内部ダクト肉厚 (mm)			2.0	←	
ラッパ管外対面間距離 (mm)			201.6	←	
ラッパ管肉厚 (mm)		5.0	←		
体積比 (%)		燃料	43.9	←	
		構造材	25.8	←	
		冷却材 [ピッチャント部*]	30.3 [22.0]	←	
径方向ブランケット燃料集合体		燃料形態	UO ₂ (ペレット型)	←	
		燃料スタック長さ (mm)	1,400	1,350	
		燃料ピッチ外径 (mm)	11.7	←	
		被覆管肉厚 (mm)	0.42	←	
		燃料スミ密度 (%TD)	90	←	
	スペーサ径 (mm)	1.07	←		
	ガスブレナム長さ [上部/下部] (mm)	100 / 1,100	100 / 1,150		
	燃料ピッチ全長 (mm)	2,690	2,690		
	燃料ピッチ本数	217	←		
	燃料ピッチ配列ピッチ (mm)	12.82	←		
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	201.6	←		
ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	←			

* 内部ダクト内、ラッパ管間ギャップ部の冷却材を除く

表 2-5 主要核特性

項 目	核特性	
炉心熱出力 (MWt)	3,530	
運転サイクル長さ (ヶ月)	26.3 [800日]	
燃料交換バッチ数 [炉心/径方向ブランケット]	4 / 4	
Pu富化度 [Pu/HM] (wt%)	内側炉心	19.6
	外側炉心	22.1
MA含有率 [MA/HM] (wt%)	内側炉心	3.0
	外側炉心	3.0
	平均	3.0
燃焼反応度 (% $\Delta k/kk'$)	1.8	
増殖比	炉心	0.84
	軸方向ブランケット	0.19
	径方向ブランケット	0.07
	合計	1.10
最大線出力* ¹ (W/cm)	内側炉心	411
	外側炉心	395
取出平均燃焼度 (GWd/t)	炉心	146
	軸方向ブランケット	24
	径方向ブランケット	8
	全炉心* ²	93
炉心平均比出力 (kW/kg-MOX)	40	
出力分担率	炉心	0.925
	軸方向ブランケット	0.059
	径方向ブランケット	0.016
最大高速中性子束 [E > 0.1MeV] (n/cm ² ・s)	1.8E+15	
最大高速中性子照射量 [E > 0.1MeV] (n/cm ²)	5.0E+23	
初装荷Pu-f インベントリ (t/GWe)	5.7	
原子炉倍增時間 (年)	75	
複合システム倍增時間* ³ (年)	85	
トリウム ²³² イット ²³² 反応度* ⁴ * ⁵ [EOEC] (\$)	5.9	
トップラ係数* ⁵ [EOEC] (Tdk/dT)	-4.5E-03	
実効遅発中性子割合	0.00318	

*¹ ラッパ管発熱(0.6%)、燃料膨張効果(1.2%)を考慮

*² ブランケット燃料を含む燃焼度

*³ 燃料交換・定検期間=45日、冷却期間5年

*⁴ ラッパ管間ギャップ及び内部ダクト内の冷却材は非ボイド

*⁵ 3次元三角メッシュ体系7群燃焼計算の組成を使用

表 2-6 燃料インベントリ(1/2)

ELEMENT	装荷燃料、1 バッチ当たりの重量[kg]				Pu富化度 [Pu/HM]	内側炉心	外側炉心
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ		0.196	0.221
U234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U235	21.3	19.6	20.7	17.0	40.9	37.7	78.6
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	7066.7	6517.4	6877.8	5656.7	13584.1	12534.5	26118.6
Np237	175.8	188.3	0.0	0.0	364.1	0.0	364.1
Pu238	55.3	59.2	0.0	0.0	114.6	0.0	114.6
Pu239	987.6	1058.0	0.0	0.0	2045.6	0.0	2045.6
Pu240	539.3	577.7	0.0	0.0	1116.9	0.0	1116.9
Pu241	35.6	38.1	0.0	0.0	73.6	0.0	73.6
Pu242	181.7	194.7	0.0	0.0	376.4	0.0	376.4
Am241	82.6	61.3	0.0	0.0	143.9	0.0	143.9
Am242m	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2
Am243	14.8	10.9	0.0	0.0	25.7	0.0	25.7
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	1.2	0.9	0.0	0.0	2.1	0.0	2.1
Cm245	0.4	0.3	0.0	0.0	0.7	0.0	0.7
Cm246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U合計	7088.0	6537.0	6898.4	5673.7	13625.0	12572.2	26197.1
Np合計	175.8	188.3	0.0	0.0	364.1	0.0	364.1
Pu合計	1799.5	1927.7	0.0	0.0	3727.2	0.0	3727.2
Am合計	97.5	72.3	0.0	0.0	169.8	0.0	169.8
Cm合計	1.6	1.2	0.0	0.0	2.8	0.0	2.8
HM合計	9162.3	8726.4	6898.4	5673.7	17888.8	12572.2	30461.0

ラップ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
随伴FP	35.3	33.6	0.0	0.0	68.9	0.0	68.9
FP合計	35.3	33.6	0.0	0.0	68.9	0.0	68.9

ELEMENT	取出燃料、1 バッチ当たりの重量[kg]				Pu富化度 [Pu/HM]	内側炉心	外側炉心
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ		0.219	0.229
U234	4.7	5.0	0.0	0.0	9.6	0.0	9.6
U235	5.1	8.0	10.7	12.3	13.2	23.1	36.2
U236	3.4	2.8	2.2	1.1	6.2	3.3	9.4
U238	5704.0	5696.0	6335.8	5448.5	11400.0	11784.3	23184.2
Np237	53.2	89.0	0.8	0.3	142.2	1.2	143.3
Pu238	90.2	95.3	0.3	0.1	185.5	0.3	185.8
Pu239	830.2	875.5	351.5	163.1	1705.7	514.5	2220.2
Pu240	516.8	553.0	39.7	8.5	1069.8	48.2	1118.0
Pu241	76.0	68.4	2.9	0.3	144.4	3.3	147.7
Pu242	135.0	157.7	0.2	0.0	292.6	0.2	292.8
Am241	38.4	44.4	0.3	0.0	82.8	0.3	83.2
Am242m	3.0	2.5	0.0	0.0	5.6	0.0	5.6
Am243	33.4	29.1	0.0	0.0	62.5	0.0	62.5
Cm242	2.2	1.5	0.0	0.0	3.7	0.0	3.7
Cm243	0.3	0.2	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5
Cm244	18.3	10.6	0.0	0.0	28.8	0.0	28.8
Cm245	2.6	1.2	0.0	0.0	3.8	0.0	3.8
Cm246	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3
U合計	5717.2	5711.8	6348.7	5461.9	11428.9	11810.6	23239.5
Np合計	53.2	89.0	0.8	0.3	142.2	1.2	143.3
Pu合計	1648.1	1750.0	394.6	172.0	3398.1	566.5	3964.6
Am合計	74.8	76.1	0.3	0.0	150.9	0.4	151.3
Cm合計	23.6	13.5	0.0	0.0	37.1	0.0	37.1
HM合計	7516.8	7640.3	6744.4	5634.2	15157.1	12378.7	27535.8

ラップ化FP	1645.5	1086.1	154.0	39.5	2731.7	193.5	2925.2
随伴FP	35.3	33.6	0.0	0.0	68.9	0.0	68.9
FP合計	1680.8	1119.7	154.0	39.5	2800.6	193.5	2994.1

表 2-6 燃料インベントリ(2/2)

ELEMENT	平衡サイクル初期、重量[kg]		Pu富化度 [Pu/HM]		内側炉心	外側炉心	合計
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	0.207	0.225	
U234	7.2	7.3	0.0	0.0	14.5	0.0	14.5
U235	52.6	57.0	65.4	60.5	109.5	125.9	235.4
U236	7.2	5.2	4.0	1.8	12.3	5.8	18.2
U238	26121.7	24798.1	26681.1	22313.9	50919.7	48995.0	99914.7
Np237	469.7	577.5	1.3	0.5	1047.2	1.8	1049.0
Pu238	330.0	321.5	0.2	0.0	651.5	0.3	651.8
Pu239	3713.8	3927.9	624.6	264.1	7641.7	888.7	8530.4
Pu240	2133.6	2281.3	41.1	8.0	4414.9	49.1	4464.1
Pu241	233.7	215.8	2.1	0.2	449.5	2.4	451.9
Pu242	647.9	717.9	0.1	0.0	1365.8	0.1	1365.9
Am241	241.0	211.2	0.2	0.0	452.1	0.2	452.3
Am242m	8.6	5.7	0.0	0.0	14.3	0.0	14.3
Am243	98.1	77.5	0.0	0.0	175.6	0.0	175.6
Cm242	9.2	5.2	0.0	0.0	14.4	0.0	14.4
Cm243	0.9	0.3	0.0	0.0	1.2	0.0	1.2
Cm244	30.8	17.0	0.0	0.0	47.8	0.0	47.8
Cm245	3.8	2.0	0.0	0.0	5.7	0.0	5.7
Cm246	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3
U合計	26188.6	24867.5	26750.5	22376.2	51056.1	49126.7	100182.7
Np合計	469.7	577.5	1.3	0.5	1047.2	1.8	1049.0
Pu合計	7059.0	7464.5	668.1	272.4	14523.5	940.6	15464.1
Am合計	347.7	294.4	0.2	0.0	642.0	0.2	642.2
Cm合計	44.9	24.6	0.0	0.0	69.5	0.0	69.5
HM合計	34109.8	33228.5	27420.1	22649.1	67338.3	50069.2	117407.5

ヲプ°化FP	2539.6	1677.3	173.7	45.8	4216.9	219.5	4436.4
随伴FP	141.3	134.4	0.0	0.0	275.6	0.0	275.6
FP合計	2680.8	1811.7	173.7	45.8	4492.5	219.5	4712.0

ELEMENT	平衡サイクル末期、重量[kg]		Pu富化度 [Pu/HM]		内側炉心	外側炉心	合計
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	0.213	0.227	
U234	11.9	12.2	0.0	0.0	24.1	0.0	24.1
U235	36.4	45.4	55.4	55.8	81.8	111.2	193.1
U236	10.6	7.9	6.2	2.9	18.5	9.1	27.6
U238	24758.9	23976.7	26139.2	22105.6	48735.6	48244.8	96980.4
Np237	347.0	478.2	2.1	0.9	825.3	2.9	828.2
Pu238	364.9	357.6	0.5	0.1	722.5	0.6	723.1
Pu239	3556.3	3745.4	976.1	427.2	7301.8	1403.2	8705.0
Pu240	2111.1	2256.7	80.8	16.5	4367.8	97.4	4465.2
Pu241	274.2	246.1	5.1	0.5	520.3	5.6	525.9
Pu242	601.1	681.0	0.3	0.0	1282.1	0.3	1282.4
Am241	196.7	194.3	0.5	0.1	391.1	0.5	391.6
Am242m	11.5	8.1	0.0	0.0	19.7	0.0	19.7
Am243	116.7	95.7	0.0	0.0	212.4	0.0	212.4
Cm242	11.4	6.7	0.0	0.0	18.1	0.0	18.1
Cm243	1.2	0.5	0.0	0.0	1.7	0.0	1.7
Cm244	47.8	26.7	0.0	0.0	74.5	0.0	74.5
Cm245	6.0	2.9	0.0	0.0	8.8	0.0	8.8
Cm246	0.5	0.2	0.0	0.0	0.6	0.0	0.6
U合計	24817.8	24042.2	26200.8	22164.4	48860.0	48365.1	97225.1
Np合計	347.0	478.2	2.1	0.9	825.3	2.9	828.2
Pu合計	6907.6	7286.8	1062.7	444.4	14194.4	1507.1	15701.5
Am合計	325.0	298.2	0.5	0.1	623.2	0.5	623.7
Cm合計	66.9	36.9	0.0	0.0	103.8	0.0	103.8
HM合計	32464.3	32142.3	27266.1	22609.6	64606.6	49875.7	114482.3

ヲプ°化FP	4185.1	2763.5	327.7	85.2	6948.6	413.0	7361.5
随伴FP	141.3	134.4	0.0	0.0	275.6	0.0	275.6
FP合計	4326.3	2897.9	327.7	85.2	7224.2	413.0	7637.2

表 2-7 制御棒価値

単位：%Δk/kk'

項目	主炉停止系制御棒	後備炉停止系制御棒	
	ワンロッドスタック時	全数挿入時	ワンロッドスタック時
ノミナル値*1	7.3	2.5	2.1
最小値*2	6.6	2.3	1.9

*1 群縮約、非均質、輸送及びメッシュ効果を考慮した値

*2 制御棒価値の予測誤差9% (3σ) を考慮した値

表 2-8 制御反応度収支

単位：%Δk/kk'

項目	主炉停止系制御棒		後備炉停止系制御棒	
	ワンロットスタック時	全数挿入時	ワンロットスタック時	全数挿入時
(1) 計画余剰反応度	3.7	0.8	0.6	0.6
a. 出力補償	(0.8)	(0.8)	(0.6)	(0.6)
b. 燃焼補償	(2.7)	-	-	-
c. 運転余裕	(0.2)	-	-	-
(2) 余剰反応度不確かさ	0.5	0.2	0.1	0.1
a. 臨界予測誤差	(0.0)	-	-	-
b. 出力補償予測誤差	-	(0.12)	(0.09)	(0.09)
c. 燃料製作公差	(0.39)	-	-	-
d. 燃料交換余裕	(0.20)	-	-	-
(3) 事故時投入反応度	-	0.2	0.2	0.2
(4) 必要制御反応度合計	4.2	1.2	0.9	0.9
(5) 制御棒価値	6.6	2.3	1.9	1.9
(6) 炉停止余裕	2.4	1.1	1.0	1.0

*1 出力補償反応度は、燃料のドップラ反応度に炉心各部の熱膨張効果を加えて評価

表 2-9 反応度特性 (平衡サイクル末期 定格出力時)

項 目		内側炉心	外側炉心	合計	
ナトリウムボイド反応度 * ¹ (\$)		4.4	1.4	5.9	
ドップラ係数 (Tdk/dT)	燃料 (炉心部) * ²	-3.20E-03	-1.30E-03	-4.50E-03	
	構造材	被覆管	-6.05E-04	-2.41E-04	-8.46E-04
		被覆管以外 * ³	-4.12E-04	-1.64E-04	-5.76E-04
		合計	-1.02E-03	-4.06E-04	-1.42E-03
密度係数 ($\Delta k/kk' / \Delta \rho / \rho$)	燃料	1.89E-01	9.83E-02	2.87E-01	
	構造材	-5.84E-02	-2.08E-02	-7.92E-02	
	冷却材 * ⁴	-2.07E-02	-7.10E-03	-2.78E-02	
形状係数	軸方向 ($\Delta k/kk' / \Delta H/H$)	0.09020	0.04702	0.13722	
	径方向 ($\Delta k/kk' / \Delta R/R$)	0.02193	0.01143	0.03336	

*¹ 非均質及びメッシュ効果を考慮した値

*² 非均質効果を考慮した値

*³ ラップ管、内部ダクト、スペーサワイヤ

*⁴ 集合体セル内の全ての冷却材

[注記]

ブランケット燃料のドップラ係数 [非均質効果考慮] (Tdk/dT)

上部軸ブランケット・・・・・・ -1.37E-04

下部軸ブランケット・・・・・・ -6.85E-04

径方向ブランケット・・・・・・ -1.21E-04

表 2-10 温度係数 (平衡サイクル末期 定格出力時)

[単位 : $10^{-6} \Delta k/kk' / ^\circ\text{C}$]

項 目		内側炉心	外側炉心	合計
膨張反応度	燃料 (炉心部)	-1.7	-0.8	-2.5
	被覆管	1.6	0.5	2.1
	被覆管以外 * ¹	0.5	0.2	0.7
	冷却材 * ²	5.1	1.7	6.8
	炉心支持板	-6.5	-3.4	-9.9
ドップラ反応度 * ³		-2.1	-1.0	-3.1

*¹ ラップ管、内部ダクト、スペーサワイヤ

*² 集合体セル内の全ての冷却材、非均質効果を考慮した値

*³ 燃料のみ、非均質効果を考慮した値

表 2-11 動特性パラメータ (平衡サイクル末期)

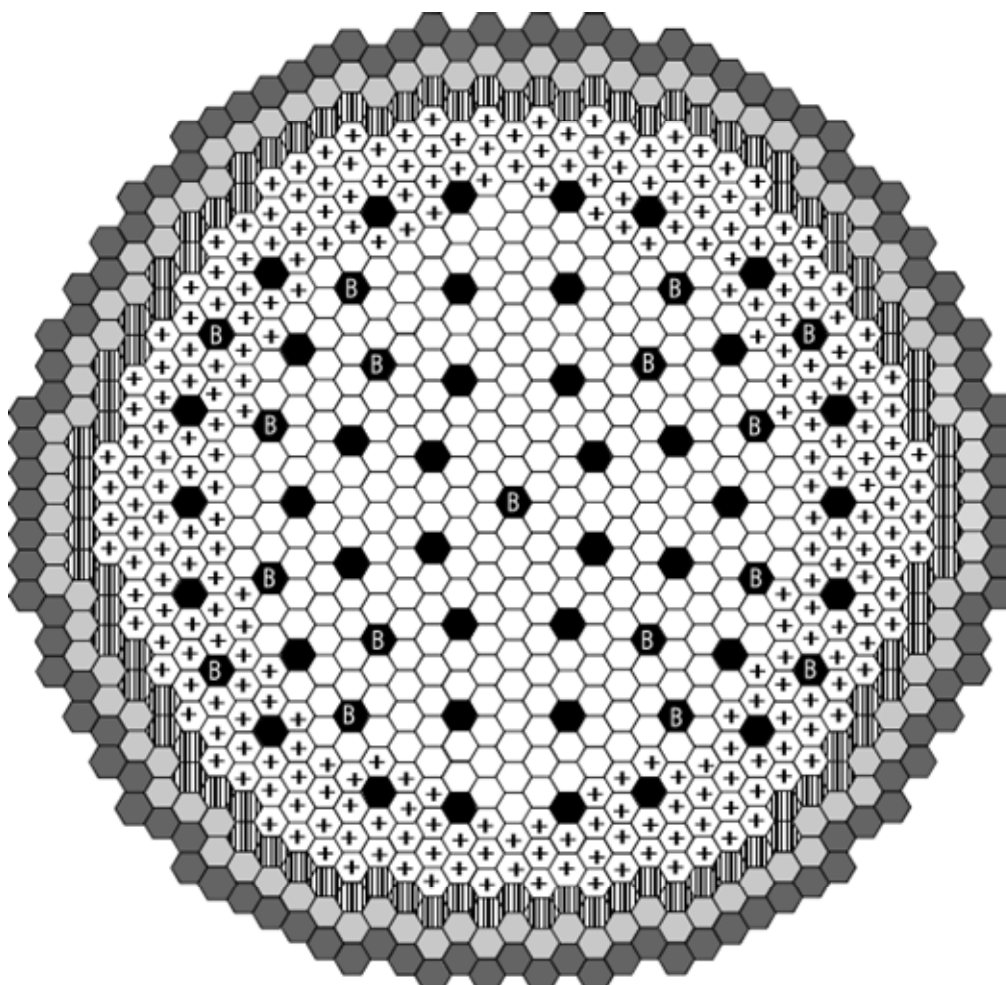
項 目		評 価 値
実効遅発中性子割合	β_1	0.00007
	β_2	0.00066
	β_3	0.00058
	β_4	0.00116
	β_5	0.00054
	β_6	0.00016
	合計	0.00318
遅発中性子先行核の 崩壊定数 (s ⁻¹)	λ_1	0.01
	λ_2	0.03
	λ_3	0.13
	λ_4	0.34
	λ_5	1.37
	λ_6	3.77
即発中性子寿命 (μ s)		0.36

表 2-12 炉心流量配分と熱流力特性及び被覆管 CDF

領域	流量領域	集合体数	集合体流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	被覆管最高温度* ¹ (°C)	バンドル部 圧力損失 (MPa)	被覆管CDF
内側炉心	1	32	35.5	1136.0	689	0.22	0.44
	2	58	33.8	1960.4	690	0.20	0.45
	3	114	32.1	3659.4	690	0.19	0.32
	4	84	28.8	2419.2	700	0.16	0.43
	小計	288	—	9175.0	—	—	—
外側炉心	5	40	31.9	1276.0	700	0.18	0.06
	6	74	28.2	2086.8	699	0.15	0.05
	7	88	24.4	2147.2	699	0.12	0.03
	8	72	19.3	1389.6	700	0.09	0.004
	小計	274	—	6899.6	—	—	—
径方向 ブランケット	9	34	9.1	309.4	699	—	—
	10	62	6.0	372.0	698	—	—
	小計	96	—	681.4	—	—	—
合計		658	—	16756.0 * ²	—	—	—

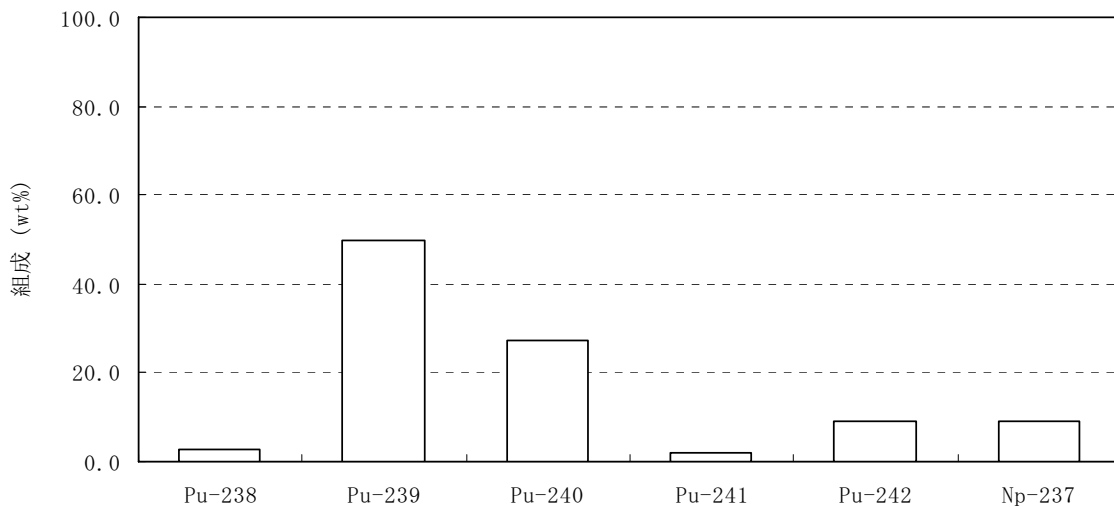
*¹ 肉厚中心、ホットスポット温度

*² 1次系流量の93.1%[燃料集合体に配分可能な流量=95.5%]

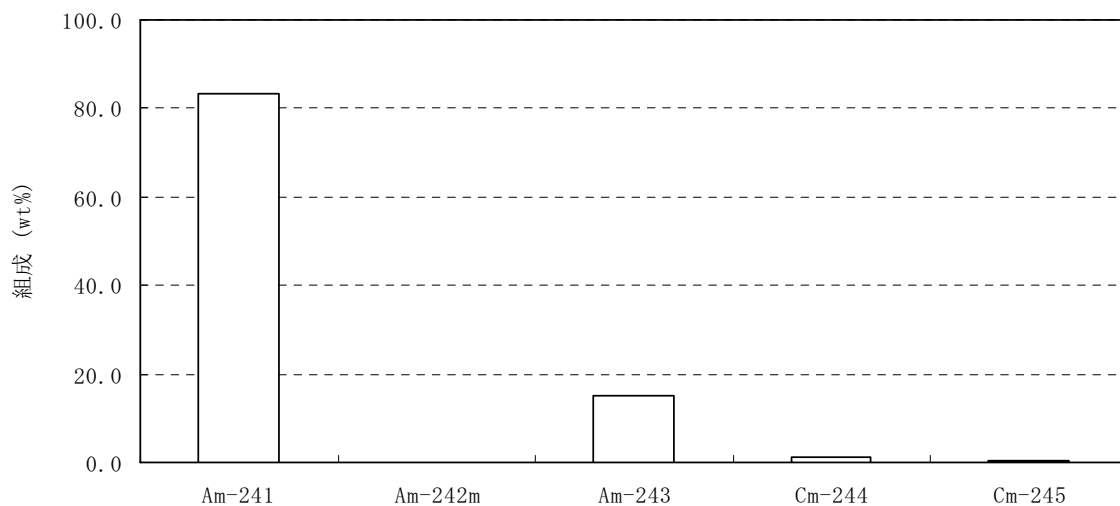


○	内側炉心燃料集合体	288体
+	外側炉心燃料集合体	274体
	径方向ブランケット燃料集合体	96体
●	主炉停止系制御棒	40体
●B	後備炉停止系制御棒	17体
○	ステンレス鋼遮へい体	102体
●	Zr-H遮へい体	108体
合 計		925体

図 2-1 炉心配置



Pu, Np組成



Am, Cm組成

図 2-2 核設計検討用軽水炉使用済燃料 TRU 組成

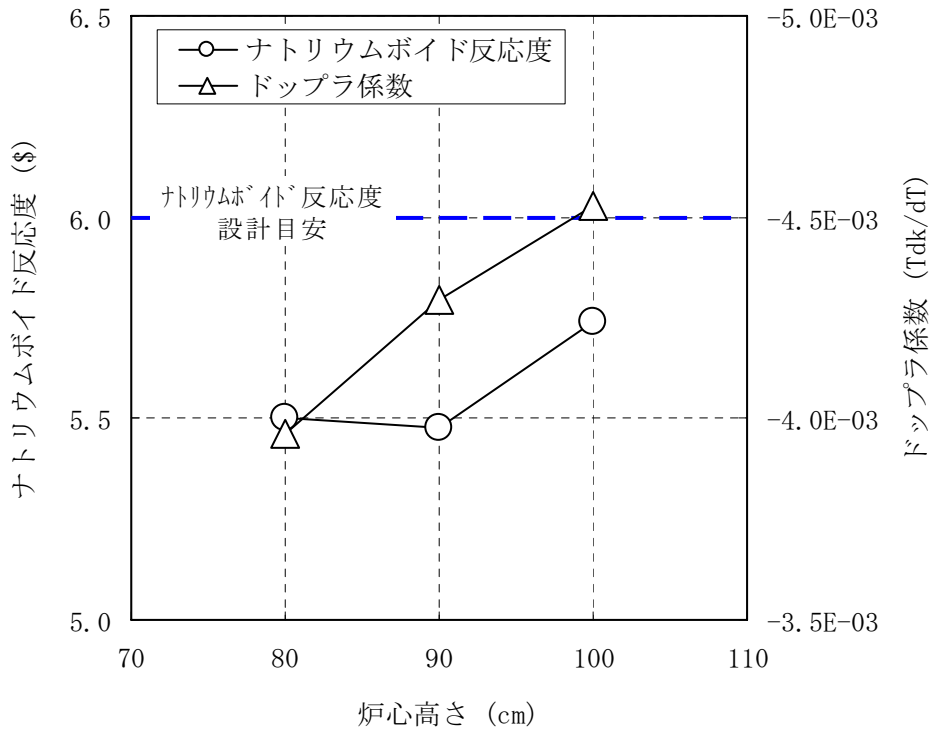


図 2-4 炉心高さとナトリウムボイド反応度及びドップラ係数の関係

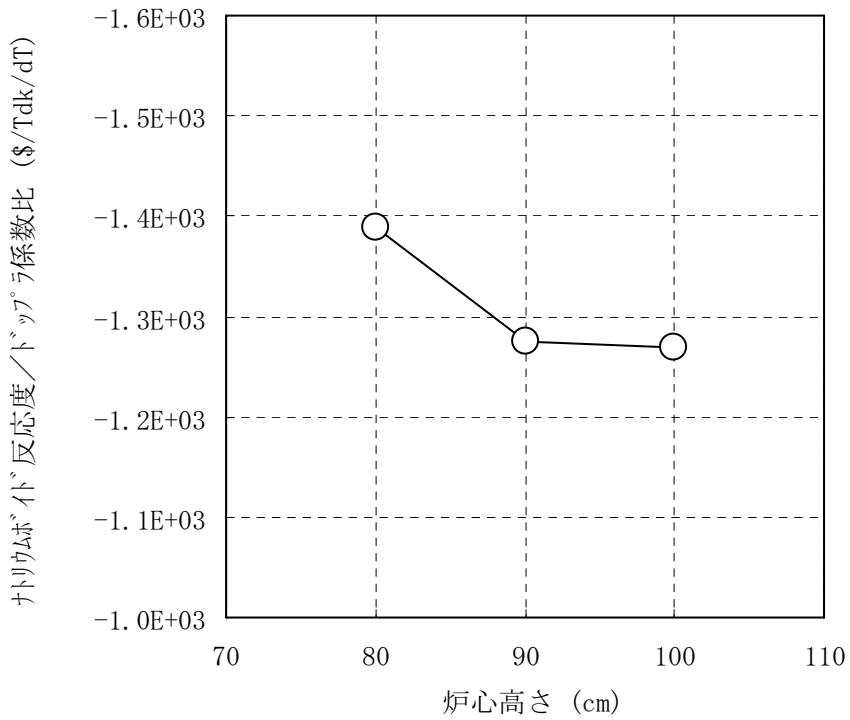
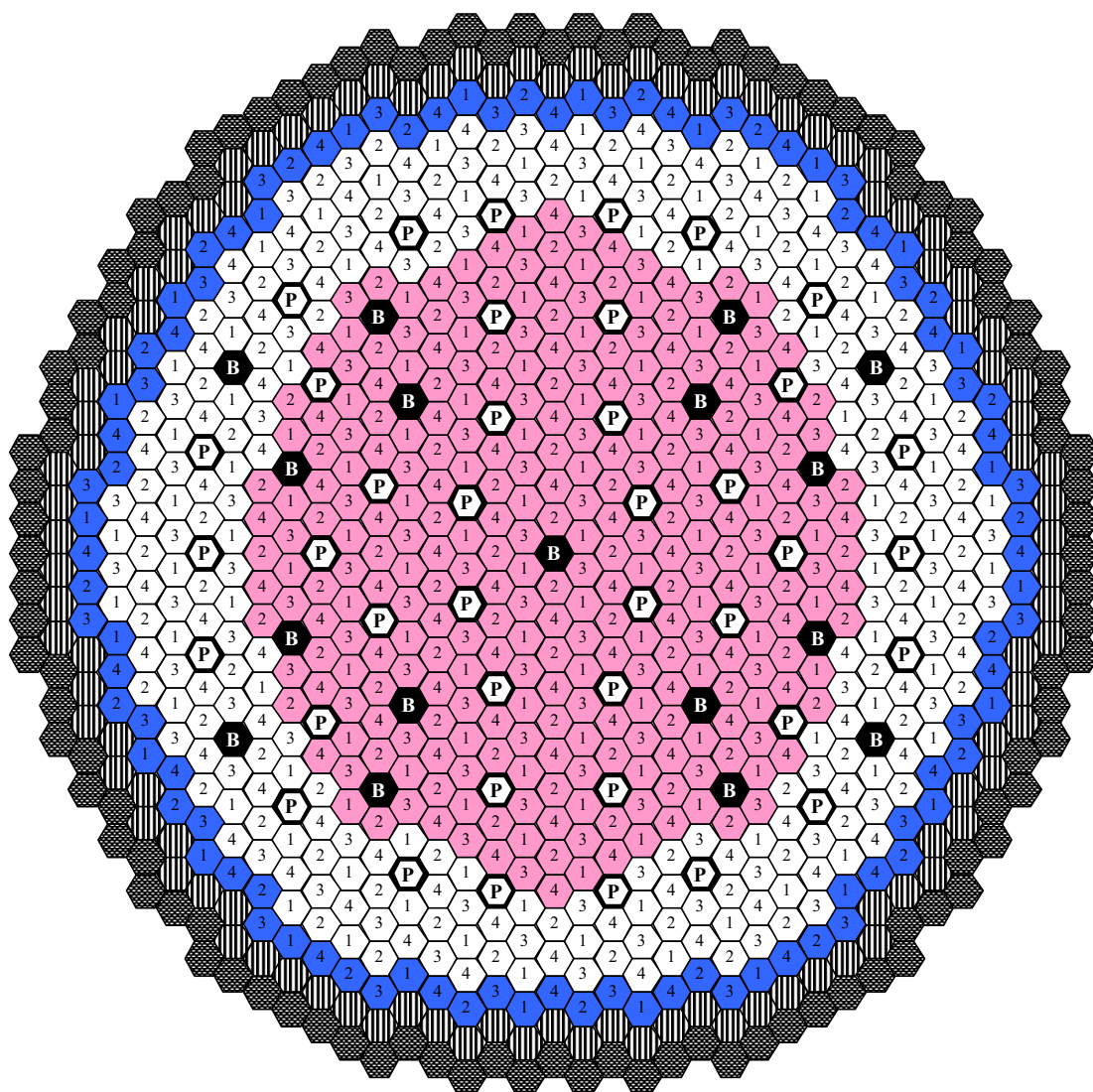


図 2-5 炉心高さとナトリウムボイド反応度/ドップラ係数比の関係



	内側炉心燃料集合体	288体
	外側炉心燃料集合体	274体
	径方向ブランケット燃料集合体	96体
	ステンレス鋼遮へい体	102体
	Zr-H遮へい体	108体
	主炉停止系制御棒	40体
	後備炉停止系制御棒	17体
	合計	925体

注) 燃料交換体数は以下の通り。

サイクル	内側炉心	外側炉心	径方向 ブランケット
1	72	68	24
2	72	68	24
3	72	68	24
4	72	70	24

図 2-6 燃料交換パターン

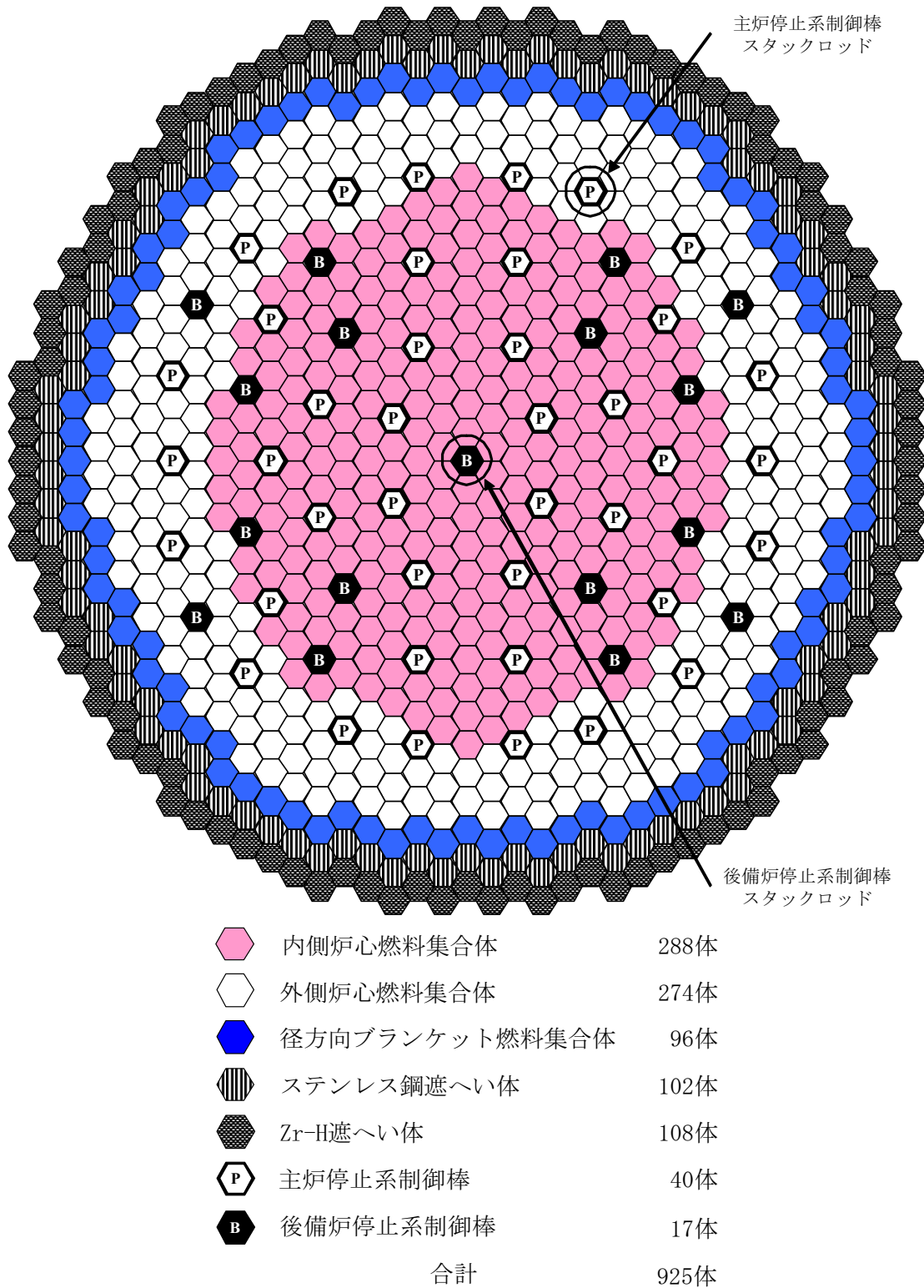
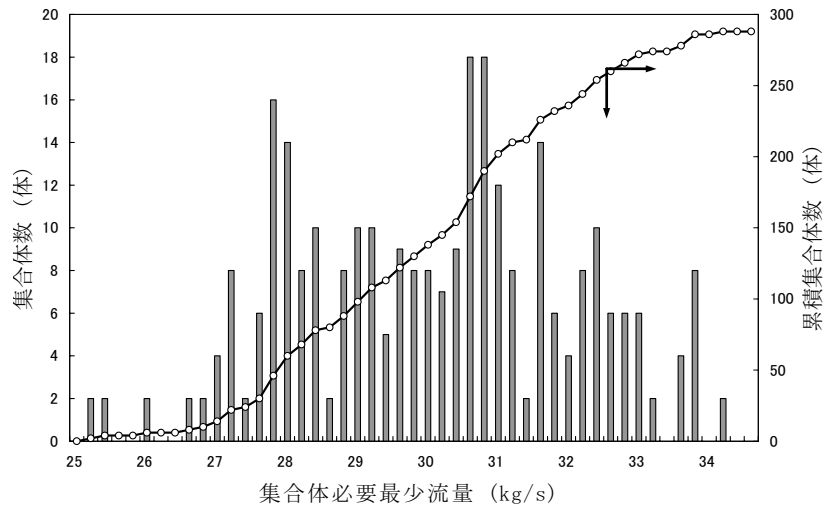
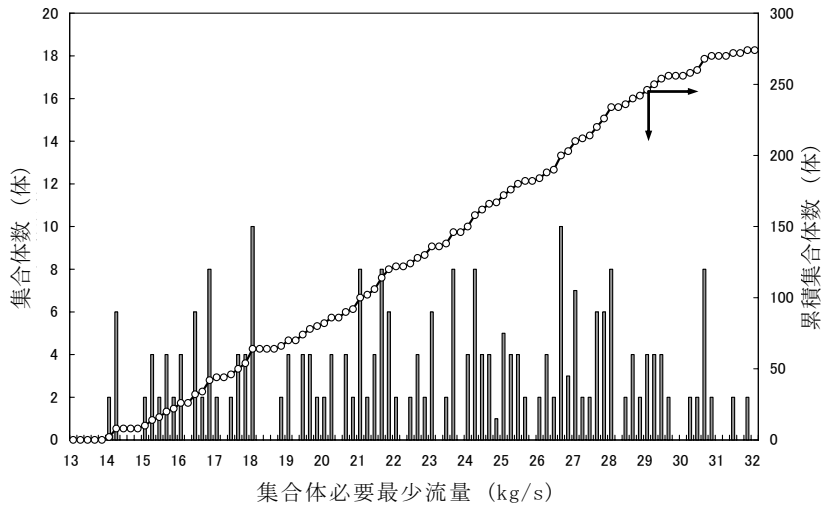


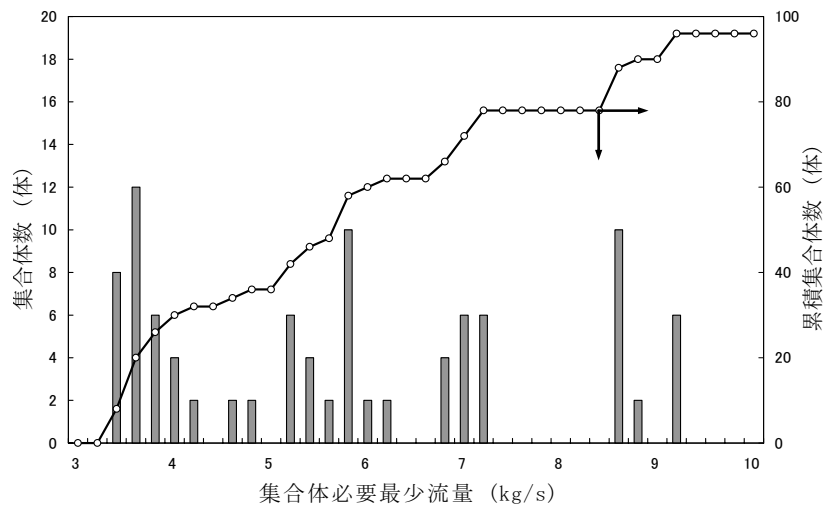
図 2-7 制御棒価値が最小となるスタック制御棒位置



(a) 内側炉心燃料集合体

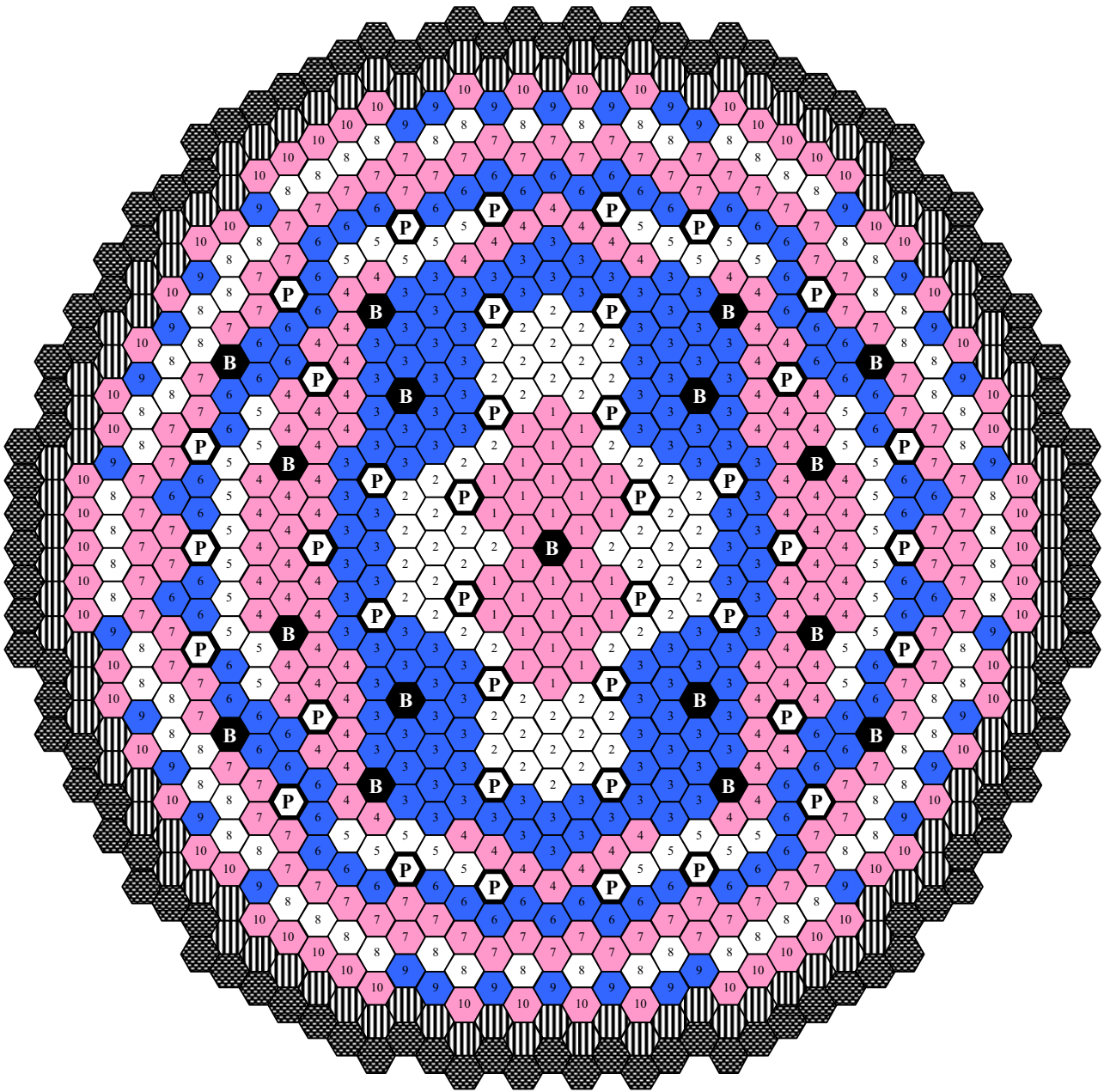


(b) 外側炉心燃料集合体



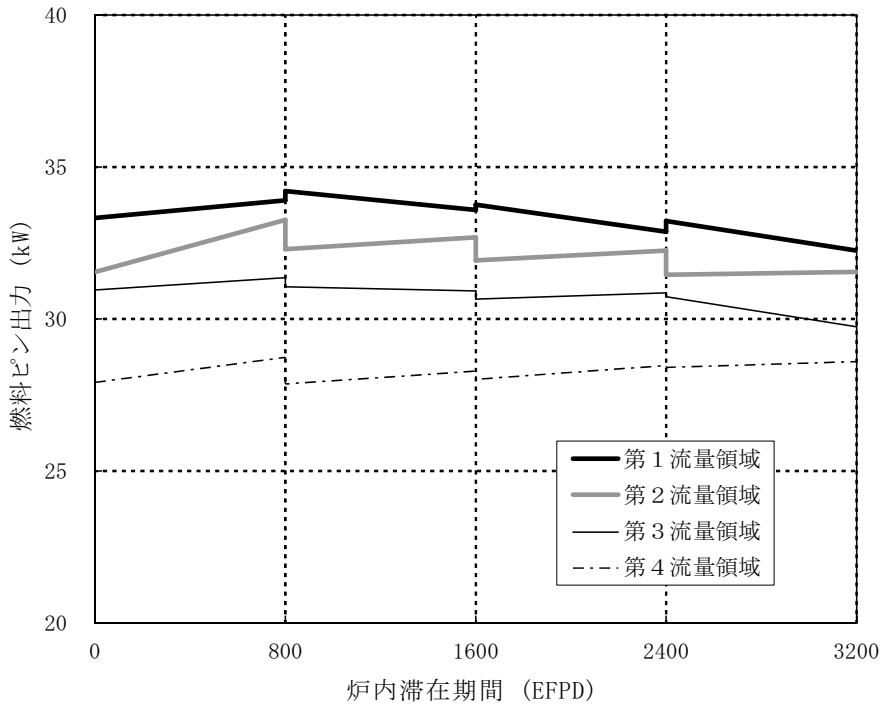
(c) 径方向ブランケット燃料集合体

図 2-8 燃料集合体必要最少流量の度数分布

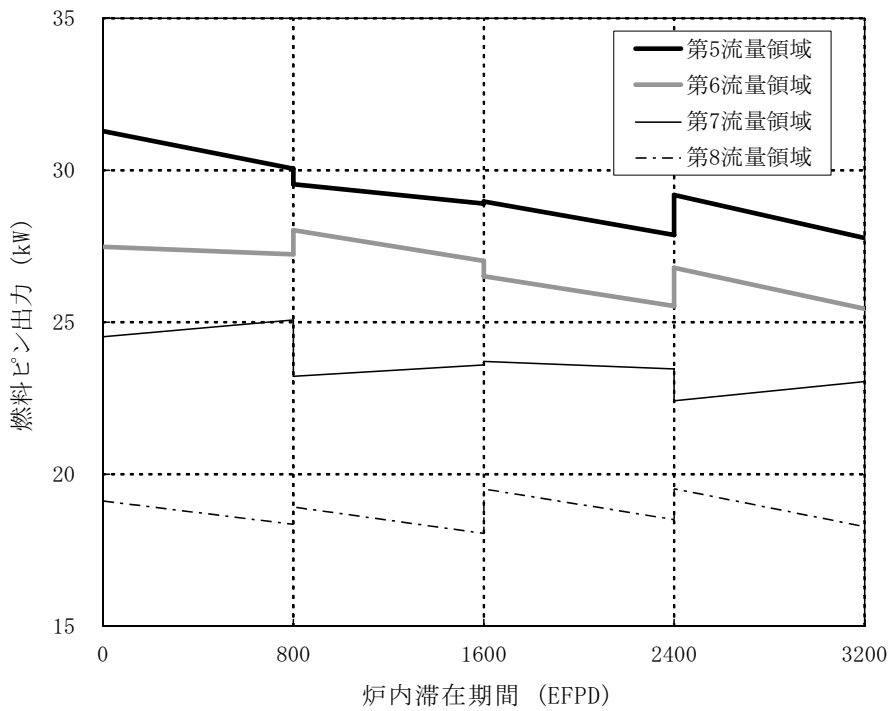


内側炉心 (288 体)	外側炉心 (274 体)	径方向ブランケット (96 体)
第 1 流量領域 32 体	第 5 流量領域 40 体	第 9 流量領域 34 体
第 2 流量領域 58 体	第 6 流量領域 74 体	第 10 流量領域 62 体
第 3 流量領域 114 体	第 7 流量領域 88 体	
第 4 流量領域 84 体	第 8 流量領域 72 体	

図 2-9 炉心流量領域区分

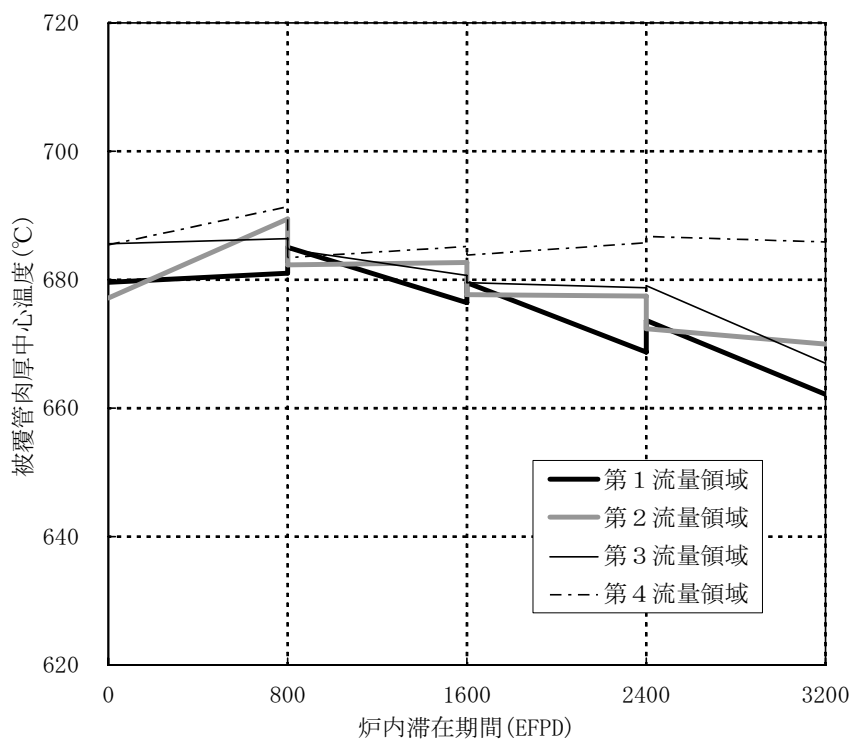


(a) 内側炉心燃料

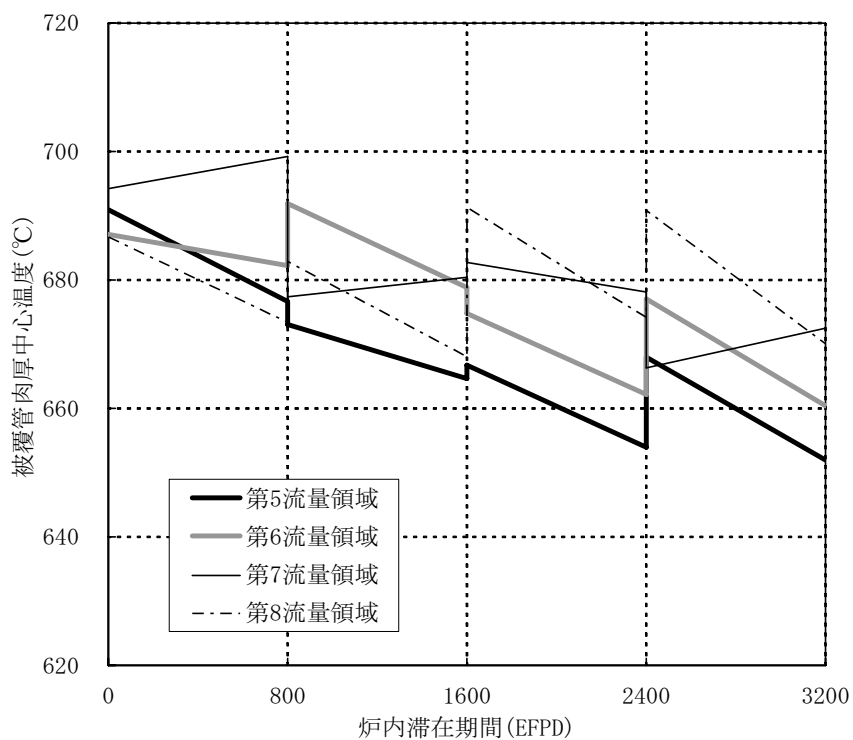


(b) 外側炉心燃料

図 2-10 CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴



(a) 内側炉心燃料



(b) 外側炉心燃料

図 2-11 燃料ピンの被覆管最高温度(肉厚中心)履歴

3. ブランケットへの Pu 添加による核不拡散性向上炉心の検討

本章では、第 2 章で設定した軽水炉使用済燃料回収 TRU を用いた大型 MOX 燃料高内部転換型炉心をベースに、更なる核不拡散性の向上を目的としてブランケットへ予め Pu を添加する方法を検討した結果を示す。

3.1 背景

FaCT における核不拡散性に関する開発目標として、核不拡散性を高める技術の適用、効果的・効率的な保障措置システムの適用、核物質等の盗取と施設の妨害破壊行為を抑止できる核物質防護システムの適用、が挙げられている⁵⁾。核不拡散性を確保する上で、保障措置や核物質防護等の外的 (extrinsic) な面における対策・措置の重要性は言うまでもない。本研究では、炉心・燃料設計上の工夫の余地のある内的 (intrinsic) な面における更なる核不拡散性向上を目指し、グレードの高い兵器級 Pu (^{240}Pu 同位体組成比で <7%) を生成する高速増殖炉のブランケット燃料に着目し、炉心燃料用の Pu を予めブランケットに添加することにより、ブランケットにおける Pu を常に原子炉級以下 (^{240}Pu 同位体組成比で >18%) に保つ方法を検討した。

ただし、Pu を原子炉級以下にしたとしても、どんな組成の Pu でも核爆発を起こさせることを原理的に可能とする文献情報⁶⁾があるため、核兵器及び核爆発装置への Pu 転用可能性を完全に否定できるものではない。しかし、原子炉級以下の Pu を用いる場合、爆発の信頼性が落ちること、爆縮に高い技術が要求されること、さらに発熱や放射線に対する対応が必要であることから、戦略兵器として魅力の乏しいものとなることが指摘されており^{7,8)}、Pu を原子炉級以下とすることが核不拡散性を相対的に高めると言うことはできるだろう。また、高性能の核兵器を所有する上で不可欠な要素を自ら放棄し、平和国家日本の姿勢として国内外にアピールする社会的な効果も期待できると考えられる。

3.2 検討条件

第 2 章で設定した軽水炉使用済燃料回収 TRU を用いた大型 MOX 燃料高内部転換型炉心 (以下、「MA 含有燃料炉心」と称する) を対象として、ブランケットに Pu を添加した場合に必要な設計対応と、炉心・燃料設計の成立性見通しを評価した。本炉心を「核不拡散性向上炉心」と呼ぶことにする。核不拡散性向上炉心の炉心・燃料設計に係るプラ

ント仕様、炉心・燃料基本仕様、燃料健全性及び安全設計に係る設計目安、他設計との取
合条件、炉心性能目標、解析評価手法は、第 2 章で示したとおりである。以下に追加点及
び変更点を記載する。

(1) Pu の等級

本検討では、当面の設計目標として、「ブランケットにおける平均的な Pu 組成が常
に原子炉級以下 (^{240}Pu 同位体組成比で $>18\%$) に保たれること」を設定した。ここで、
B. Pellaud が広く用いられている伝統的なものとして示した Pu の等級を暫定的に適用
するものとした。

B. Pellaud の論文に示された Pu の等級 (文献[8])

・ スーパー級 (Super grade)	$x < 3\%$	Best quality
・ 兵器級 (Weapon grade)	$3\% < x < 7\%$	Standard material
・ 燃料級 (Fuel grade)	$7\% < x < 18\%$	Practically usable
・ 原子炉級 (Reactor grade)	$18\% < x < 30\%$	Conceivably usable
・ MOX 級 (MOX grade)	$30\% < x$	Practically unusable

($x = ^{240}\text{Pu}$ 同位体組成比)

B. Pellaud は原子炉級 Pu について、「粗悪な爆発装置を作るのに原理的に使用可能
であり、現実的な困難さはそれでもやはり相当なものである。」と述べ、Conceivably
usable (ひょっとすると利用可能) と付している。

(2) ブランケットに添加する Pu (TRU) 組成

設計検討用の TRU 組成である ALWR 使用済燃料回収 TRU 組成 (炉外時間 40 年)
は、高速炉新燃料における MA 含有率 3 wt% の条件の下、軽水炉使用済燃料から高速
炉へ供給される可能性のある様々な TRU 組成の中で、炉心安全性に係る反応度係数(ナ
トリウムボイド反応度、ドップラ係数)の観点から保守側に設定したものである。同組
成は、ナトリウムボイド反応度が大きく、ドップラ係数の絶対値が小さくなる fertile
(核分裂を起こしにくい核種)の組成比の多い、いわゆる高質量数化(高次化)した組
成となっている。

この高質量数化した組成は、ブランケットの Pu の核不拡散性を高める目的を達成しやすい組成である。反対に高質量数化のなるべく進んでいない組成を選ぶことが、ブランケットに添加する TRU 組成としては保守的な条件となる。そこで、軽水炉使用済燃料から高速炉へ供給される可能性のある様々な TRU 組成の中で最も高質量数化の進んでいない、LWR 使用済燃料回収 TRU 組成（炉外時間 4 年）

$${}^{238}\text{Pu}/{}^{239}\text{Pu}/{}^{240}\text{Pu}/{}^{241}\text{Pu}/{}^{242}\text{Pu}/{}^{237}\text{Np}/{}^{241}\text{Am}/{}^{243}\text{Am}/{}^{244}\text{Cm}$$

$$=2.3/46.5/23.1/11.0/6.7/5.8/2.8/1.4/0.4 \text{ wt\%}$$

※ PWR（燃焼度 49 GWd/t）と BWR（45 GWd/t）の使用済燃料中の TRU を 1:1 で混合

をブランケットに添加する TRU 組成に設定した。ここで、MA は使用済燃料回収組成のまま過不足なく付随するものとした。随伴 FP についてはブランケットに添加したときの含有率が少ないことから無視するものとした。

(3) ブランケットへの TRU 添加率

ブランケットへの TRU 添加率をパラメータに、MA 含有燃料炉心の軸方向及び径方向ブランケットに上記の LWR 使用済燃料回収 TRU 組成（炉外時間 4 年）を添加した場合の炉心計算を行った。

図 3-1 に軸方向及び径方向ブランケットの取出 Pu 同位体組成と TRU 添加率との関係を示す。これより、ブランケットへの TRU 添加率を 5 wt%程度とすれば、軸方向ブランケット、径方向ブランケット共に、平均 Pu 組成を原子炉級に保つことができることがわかる。

この結果を踏まえて、ブランケットへの TRU 添加率を 5 wt%とした。

(4) 炉心仕様の設定

ブランケットに TRU を添加することにより、ブランケットの出力分担が増え、炉心平均比出力が減少する。炉心平均比出力は安全要求より 40 kW/kg-MOX 程度以上とする必要がある。参照炉心である MA 含有燃料炉心の炉心平均比出力は 40 kW/kg-MOX であり（表 2-5 参照）余裕が殆どないことから、ブランケットへの TRU 添加とともに炉心燃料インベントリを削減する必要がある。ここでは、炉心高さの低減により対応す

るものとし、TRU 添加率が 5 wt% の場合は、炉心高さを 100 cm から 90 cm に変更することにより、炉心平均比出力を満足させる見通しが得られた。なお、ブランケットへの TRU 添加によって、炉心部取出平均燃焼度も減少するが、上記の炉心高さ減少により、MA 含有燃料炉心程度にまで回復させることができる。

ブランケットへの TRU 添加により若干の増殖比の低下が生じるが、炉心高さの減少は増殖比をさらに低下させる。そこで、増殖比 1.1 程度となるように軸方向ブランケットの伸長により対応するものとした。ブランケットへの TRU 添加率 5 wt%、炉心高さ 90 cm の場合、軸方向ブランケット厚さ(上部/下部)を 35 (15/20) cm から、55 (25/30) cm に増加することで増殖比の要求を満足できることがわかった。これより、軸方向ブランケット厚(上部/下部) 55 (25/30) cm を選択することにした。

3.3 炉心特性評価

3.3.1 核特性評価

前記 3.2 (4)項で設定した炉心仕様を基に、核不拡散性向上炉心の燃焼特性、出力分布、制御反応度収支、反応度係数等を評価した。

(i) 主要核特性

表 3-1 及び表 3-2 に主要核特性及び燃料インベントリを示す。

Pu 富化度は、内側炉心が 19.6 wt%、外側炉心が 21.9 wt% であり、MA 含有燃料炉心と比べ大きな変化はない。燃焼反応度は $1.5 \% \Delta k/k'$ であり、MA 含有燃料炉心と比べ若干減少している。

軸方向ブランケットの伸長の結果、増殖比 1.099 が得られており、炉心性能目標を満足している。

炉心平均比出力は 41 kW/kg-MOX、ナトリウムボイド反応度は 5.7 \$ と、設計目安を満足する。ドップラ係数は $-4.3 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ である。

最大線出力は内側炉心が 393 W/cm、外側炉心が 378 W/cm と、ブランケットの出力分担率の増加のため MA 含有燃料炉心と比べ減少している。また、最大高速中性子照射量は、 $4.9 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 、取出平均燃焼度が炉心部で 147 GWd/t、ブランケット燃料を含む全炉心では 85 GWd/t と、いずれも設計条件を満足する。

燃料インベントリ (表 3-2) を見ると、取出時 ^{240}Pu 同位体組成比が、軸方向ブランケット平均で 19.0 wt%、径方向ブランケット平均で 19.8 wt% となっており、

Pu が原子炉級であることが確認できる。

MA 含有燃料炉心と比べ核特性が悪化したものとして、ブランケットへの TRU 添加に伴う初装荷核分裂性 Pu 重量の増加 (5.7 → 6.4 t/GWe) があげられる。

(ii) 制御棒価値及び制御反応度収支

表 3-3 に制御棒価値を示し、表 3-4 に制御反応度収支を示す。制御棒価値は MA 含有燃料炉心と比べて 5～9%程度小さい値となっている。これは、炉心高さ低減、ブランケットへの TRU 添加により、炉心部の反応度に対する寄与が減少したためと考えられる。制御棒価値は減少しているが、主炉停止系については必要制御反応度中の燃焼補償も小さくなっているため、十分な炉停止余裕を有している。後備炉停止系についても炉停止余裕を確保できており、制御反応度収支は成立する見込みである。

(iii) 反応度及び動特性パラメータ

表 3-5 に、平衡サイクル末期におけるナトリウムボイド反応度、ドップラ係数、密度係数及び形状係数を示し、また、これらの反応度係数を用いて評価した温度係数を表 3-6 に示す。なお、表 3-7 に動特性パラメータ（実効遅発中性子割合、遅発中性子崩壊定数、即発中性子寿命）を示す。

3.3.2 熱流力特性・燃料健全性評価

前項の出力分布に基づき核不拡散性向上炉心の炉心流量配分領域区分を設定し、燃料集合体の熱流力特性を評価した。続いて、燃料ピン出力と被覆管温度履歴より、燃料健全性に係る主要評価項目である被覆管の CDF を評価した。

(1) 評価条件・方法

評価条件・方法は前記 2.3.2 項及び 2.3.3 項にて示したとおりである。以下では相違点を述べる。

核不拡散性向上炉心の炉心及びブランケット燃料集合体仕様における MA 含有燃料炉心からの変更点は、発熱部全長が 1350 mm から 1450 mm へと 100 mm 増加したことである。核不拡散性向上炉心では、ブランケットへの TRU 添加によって出力分布が平坦化されたため、燃料健全性に対する設計裕度が大きくなっている。そこで、下部ガスプレナム長を 100 mm 短縮した 1050 mm に仮設定し、MA 含有燃料炉心と同じ燃料

要素全長 2690 mm とすることができるようにした。表 3-8 に核不拡散向上炉心の炉心及びブランケット燃料集合体仕様をまとめる。

核不拡散性向上炉心では、軸方向ブランケットにおける出力分担が増加しているが、2.3.3 項と同様に CDF 評価においては燃料要素全出力が全て炉心燃料部で発生していると保守側に仮定して評価した。ここで、ガス状の核分裂生成物の生成率には、MA によるヘリウムガスの生成を考慮した。ブランケット部に添加する TRU 組成に高質量数化のなるべく進んでいない組成を選んだが、炉心燃料と同様の高質量数化した組成を用いる場合もあることを考慮し、ヘリウムを含むガス状核分裂生成物の生成率を設定した。

(2) 評価結果

(i) 炉心流量領域区分

図 3-2 に、被覆管肉厚中心最高温度を 700°C とするための集合体必要最少流量の度数分布を内側炉心、外側炉心及び径方向ブランケット燃料の領域毎に示す。

図 3-2 の集合体必要最少流量の度数分布を基に、炉心・径方向ブランケット燃料への配分流量の低減と流量領域区分の対称性を考慮して流量流域区分を設定した。

図 3-3 に、設定した炉心流量領域区分を示す。炉心流量領域は、内側及び外側炉心がそれぞれ 4 領域、径方向ブランケットが 2 領域である。

(ii) 炉心流量配分及び熱流力特性

表 3-9 に、各流量領域の燃料集合体流量、領域流量、被覆管最高温度及び燃料ピンバンドル部圧力損失を示す。なお、内側炉心の第 1 から第 4 流量領域の燃料集合体流量は、後述の被覆管 CDF を抑制するために被覆管肉厚中心最高温度を 700°C より若干低く設定し、それ以外の領域の燃料集合体流量は、被覆管肉厚中心最高温度を 700°C とするように設定した。ここで、ブランケットへの TRU 添加により、径方向ブランケット燃料集合体の必要冷却材流量が増加したため、炉心燃料集合体の冷却材流量を抑制することも考慮している。

結果として表 3-9 に示すように、被覆管肉厚中心最高温度及び燃料ピンバンドル部圧力損失の最大値は 700°C 及び 0.21 MPa であり設計条件を満足している。また、炉心及び径方向ブランケット燃料への流量は 16,425 kg/s (1 次系冷却材流量の 91.3%) であり、これは炉心に配分可能な流量 95.5% に対して 4.2% の余裕を有している。

(iii) 被覆管 CDF

表 3-9 に、被覆管の CDF（通常運転時）評価結果を示す。CDF の最大値は内側炉心が 0.50、外側炉心が 0.18 であり、内側炉心について余裕がほとんど無いものの、いずれも設計目安（0.5 以下）を満足している。

3.3.3 遮へい設計成立性の見通し

核不拡散性向上炉心では、ブランケットへの TRU 添加のため、ブランケットにおける中性子束の増大が予想される。このことが炉心周りの遮へい成立性に影響を及ぼす可能性がある。そこで、遮へい設計成立性を見通しを確認した FS フェーズ II の大型 MOX 燃料高内部転換型炉心（以下、FS フェーズ II 代表炉心）と中性子束を相対比較する簡易評価法により、核不拡散性向上炉心の炉心周り遮へいの成立性について概略評価することにした。

核不拡散性向上炉心の径方向遮へい構成はフェーズ II 代表炉心と同じである。核不拡散性向上炉心の軸方向ブランケット厚さは、フェーズ II 代表炉心と比べると上部軸方向ブランケットで 5 cm 増大、下部軸方向ブランケットで 10 cm 増大している。

一方、第 2 章で設定した MA 含有燃料炉心は、径方向の遮へい構成及び下部軸方向ブランケット厚さはフェーズ II 代表炉心と同じであるが、上部軸方向ブランケット厚さが 5 cm 短縮となっているため、同炉心についても炉心周り遮へいの成立性見通しを同様に確認することにした。

(1) 評価方法

炉心周りの代表的な位置（径方向ブランケット外側、上部軸方向ブランケット上端、下部軸方向ブランケット下端）での中性子束の相対比較を行うことで、炉心周り遮へいの成立性を評価するものとした。相対比較においては、フェーズ II 代表炉心での炉心周り遮へいの設計裕度を考慮して成立性を判断した。

(2) 評価結果

表 3-10 に、径方向ブランケットのステンレス鋼遮へい体側の位置での平衡末期（EOEC）における中性子束の値を比較して示した。中性子束は、軸方向には炉心中心高さ位置での値である。核不拡散性向上炉心の径方向ブランケット外側の高速中性子束

はフェーズⅡ代表炉心と比べて、20～30%増大していることがわかる。

図 3-6 にフェーズⅡ代表炉心における炉心周り遮へい特性評価結果を示す。径方向ブランケットでの高速中性子束の増加が直接影響すると考えられる炉心槽での中性子照射量に対する設計裕度はファクターで 10 あり、また、DHX の 2 次系ナトリウム配管線量に対してはファクター6、IHX の 2 次系配管線量率に対してはファクター3.5 の設計裕度がある。従って、20～30%の増大であれば、これら部位に対する遮へいの成立性は十分見込めるものと判断できる。

図 3-6 からわかるように、炉心周り遮へいで設計裕度の少ない部位は炉心支持板および UIS 下面である。それらにおける中性子照射量に対する設計裕度は、それぞれファクター1.5 と 2.0 である。表 3-11 と表 3-12 に、下部軸方向ブランケット下端と上部軸方向ブランケット上端における径方向最大中性子束を示した。下部軸方向ブランケット下端及び上部軸方向ブランケット上端における径方向高速中性子束分布を、図 3-7 及び図 3-8 にそれぞれ示した。

下部軸方向ブランケット下端での高速中性子束を見ると、炉心支持板の中性子照射量制限に直接係る炉心燃料集合体装荷領域において、核不拡散性向上炉心はフェーズⅡ代表炉心を下回ることが確認できる。軸方向ブランケットの出力分担が増えたものの、軸方向ブランケットの厚さを増加させたことによる遮へい効果が働いたと考えることができる。なお、MA 含有燃料炉心は、フェーズⅡ代表炉心と同程度の結果となっている。

上部軸方向ブランケット上端での高速中性子束については、核不拡散性向上炉心がフェーズⅡ代表炉心とほぼ同程度となっており、これも軸方向ブランケットの出力分担の増加と、軸方向ブランケットの厚さを増加させたことによる遮へい効果が打ち消しあった結果と考えることができる。一方、上部軸方向ブランケットを短縮した MA 含有燃料炉心において、上部軸方向ブランケット上端での高速中性子束がフェーズⅡ代表炉心と比べて約 50%増大していることがわかる。これは UIS 下面に対する設計裕度 2.0 に収まる範囲での増大であり、炉心周り遮へいの成立性を見通すことは可能であると判断できる。

以上、核不拡散性向上炉心、MA 含有燃料炉心の炉心周り遮へいの成立性をフェーズⅡ代表炉心との比較により概略評価した結果、両炉心とも成立性を見通せることがわかった。

3.4 まとめ

高速増殖炉の内的 (intrinsic) な核不拡散性を向上させる一方策として、ブランケット燃料に炉心燃料用の TRU を予め添加することにより、ブランケットにおける Pu を常に原子炉級以下 (^{240}Pu 同位体組成比で $>18\%$) に保つ核不拡散性向上炉心を検討した。軽水炉使用済燃料から高速炉へ供給される可能性のある様々な TRU 組成の中で、最も高質量数化の進んでいない LWR 使用済燃料回収 TRU 組成 (炉外時間 4 年) をブランケットに添加する TRU 組成に選び、ブランケットへの TRU 添加率を 5 wt% とすれば、軸方向ブランケット、径方向ブランケット共に、平均 Pu 組成を原子炉級に保つことができることを見出した。第 2 章で構築した MA 含有燃料炉心を参照炉心として検討を開始したが、炉心・燃料仕様の参照炉心からの変更は、炉心平均比出力及び炉心部取出平均燃焼度の設計条件を満足させるための、炉心高さの低減 (100 → 90 cm)、増殖比を 1.1 程度とするための軸方向ブランケットの伸長 (上下合わせて 35 → 55 cm) である。核特性上の特徴として、参照炉心と比べ最大線出力が減少、初装荷核分裂性 Pu 重量が増加した。核特性、制御反応度収支は、いずれも設計条件を満足することを確認した。

炉心流量領域は、内側及び外側炉心がそれぞれ 4 領域、径方向ブランケットが 2 領域の合計 10 領域である。燃料要素全長を参照炉心に合わせるため下部ガスプレナム長を参照炉心より 100 mm 短縮した 1050 mm に設定したが、ブランケットの出力分担率増加による出力分布平坦化によって、被覆管肉厚中心最高温度 700°C 以下、燃料ピンバンドル部圧力損失 0.2 MPa 程度以下、被覆管の CDF (通常運転時) 0.5 以下を同時に満足する流量配分の可能な見通しが得られた。

なお、本炉心ではブランケットにおける出力分担率が増加するが、炉心周りの遮へい成立性は確保できる見通しである。

表 3-1 主要核特性

項目		単位	MA含有燃料炉心	核不拡散性向上炉心
基本仕様・炉心構成	熱出力	MW _t	3530	←
	電気出力	MW _e	1500	←
	運転サイクル長さ	月	26.3	←
	燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	—	4/4	←
	炉心高さ	cm	100	90
	軸方向ブランケット厚さ (上部/下部)	cm	35 (15/20)	55 (25/30)
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	—	288/274/562	←
	径方向ブランケット体数	—	96	←
	制御棒本数 (主系/後備炉停止系)	—	40/17	←
	径方向遮へい体数 (ステンレス鋼/Zr-H)	—	102/108	←
	炉心等価直径	m	5.38	←
	遮へい体外接円径	m	6.77	←
	主要核特性	Pu富化度 [Pu/HM] (内側炉心/外側炉心)	wt%	19.6/22.1
MA含有率 [MA/HM] (内側炉心/外側炉心)		wt%	3.0/3.0	3.0/3.0
燃焼反応度		%Δk/kk'	1.8	1.5
増殖比 (炉心/軸ブラ/径ブラ)		—	1.097 (0.836/0.189/0.072)	1.099 (0.747/0.275/0.077)
最大線出力*1 (内側炉心/外側炉心)		W/cm	411/395	393/378
取出平均燃焼度 (炉心/軸ブラ/径ブラ)		GWd/t	146/24/8	147/34/15
全炉心取出平均燃焼度*2		GWd/t	93	85
炉心平均比出力		kW/kg-MOX	40	41
出力分担率 (炉心/軸ブラ/径ブラ)		%	92.5/5.9/1.6	83.9/12.9/3.2
最大高速中性子束 [E>0.1 MeV]		n/cm ² s	1.8×10 ¹⁵	1.8×10 ¹⁵
最大高速中性子照射量 [E>0.1 MeV]		n/cm ²	5.0×10 ²³	4.9×10 ²³
初装荷核分裂性Pu重量		t/GW _e	5.7	6.4
原子炉倍増時間		年	75	81
複合システム倍増時間*3		年	85	88
ナトリウムボイド反応度*4 [EOEC]		\$	5.9	5.7
ドップラ係数 [EOEC]		Tdk/dT	-4.5×10 ⁻³	-4.3×10 ⁻³
実効遅発中性子割合	—	0.00318	0.00320	

*1 ラッパ管発熱(0.6%)、燃料膨張効果(1.2%)を考慮

*2 ブランケット燃料を含む全体の取出平均燃焼度

*3 燃料交換・定検期間 45日、燃料炉外滞在期間 5年

*4 ラッパ管間ギャップ及び内部ダクト内の冷却材は非ボイド

表 3-2 燃料インベントリ(1/2) [核不拡散性向上炉心]

ELEMENT	装荷燃料、1 バッチ当たりの重量[kg]		Pu富化度		内側炉心	外側炉心	合計
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	[Pu/HM]	0.196	
U234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U235	19.1	17.7	31.0	17.4	36.8	48.4	85.2
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	6361.6	5880.0	10290.4	5784.8	12241.6	16075.2	28316.8
Np237	158.1	168.0	31.5	17.7	326.1	49.2	375.3
Pu238	49.7	52.9	12.5	7.0	102.6	19.5	122.1
Pu239	888.0	943.9	252.6	142.0	1831.9	394.6	2226.5
Pu240	484.8	515.4	125.5	70.5	1000.2	196.0	1196.2
Pu241	32.0	34.0	59.8	33.6	65.9	93.3	159.3
Pu242	163.4	173.7	36.4	20.5	337.1	56.9	393.9
Am241	74.5	56.4	15.2	8.6	130.9	23.8	154.6
Am242m	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2
Am243	13.3	10.1	7.6	4.3	23.4	11.9	35.3
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	1.1	0.8	2.2	1.2	1.9	3.4	5.3
Cm245	0.4	0.3	0.0	0.0	0.6	0.0	0.6
Cm246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U合計	6380.8	5897.7	10321.3	5802.2	12278.5	16123.5	28402.0
Np合計	158.1	168.0	31.5	17.7	326.1	49.2	375.3
Pu合計	1617.9	1719.8	486.7	273.6	3337.7	760.4	4098.1
Am合計	87.9	66.5	22.8	12.8	154.4	35.6	190.0
Cm合計	1.4	1.1	2.2	1.2	2.5	3.4	5.9
HM合計	8246.0	7853.1	10864.5	6107.6	16099.1	16972.1	33071.3
ラップ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
随伴FP	31.8	30.2	0.0	0.0	62.0	0.0	62.0
FP合計	31.8	30.3	0.0	0.0	62.0	0.0	62.0

ELEMENT	取出燃料、1 バッチ当たりの重量[kg]		Pu富化度		内側炉心	外側炉心	合計
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	[Pu/HM]	0.219	
U234	4.2	4.4	1.1	0.6	8.6	1.6	10.3
U235	4.6	7.0	17.0	12.7	11.6	29.6	41.2
U236	3.1	2.5	3.2	1.1	5.6	4.3	9.9
U238	5142.0	5114.7	9505.6	5562.6	10256.6	15068.2	25324.8
Np237	47.9	77.0	20.3	14.1	124.9	34.4	159.3
Pu238	81.4	85.6	21.2	10.3	167.1	31.6	198.6
Pu239	747.2	779.5	657.7	275.3	1526.7	933.0	2459.8
Pu240	464.2	492.0	176.2	80.2	956.2	256.4	1212.6
Pu241	68.2	61.8	34.2	19.5	129.9	53.8	183.7
Pu242	121.4	139.7	36.8	20.7	261.0	57.5	318.6
Am241	34.6	39.6	22.6	15.6	74.2	38.2	112.4
Am242m	2.7	2.3	0.9	0.4	5.1	1.3	6.4
Am243	30.1	26.5	8.9	4.7	56.6	13.6	70.2
Cm242	2.0	1.4	0.5	0.2	3.3	0.7	4.1
Cm243	0.3	0.2	0.0	0.0	0.4	0.1	0.5
Cm244	16.3	9.8	4.0	1.6	26.1	5.6	31.7
Cm245	2.3	1.1	0.5	0.1	3.4	0.6	4.0
Cm246	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3
U合計	5153.8	5128.6	9526.8	5576.9	10282.4	15103.7	25386.2
Np合計	47.9	77.0	20.3	14.1	124.9	34.4	159.3
Pu合計	1482.3	1558.6	926.2	406.1	3040.9	1332.3	4373.3
Am合計	67.4	68.4	32.5	20.7	135.8	53.2	189.0
Cm合計	21.1	12.6	5.1	1.9	33.6	7.0	40.6
HM合計	6772.5	6845.2	10510.9	6019.8	13617.7	16530.7	30148.4
ラップ化FP	1473.5	1007.9	353.6	87.8	2481.5	441.4	2922.9
随伴FP	31.8	30.2	0.0	0.0	62.0	0.0	62.0
FP合計	1505.3	1038.2	353.6	87.8	2543.5	441.4	2984.9

注) 取出燃料中の²⁴⁰Pu同位体組成比 (wt%) は以下の通り。
 内側炉心 外側炉心 軸ブラ 径ブラ 炉心合計 ブラ合計 合計
 31.3% 31.6% 19.0% 19.8% 31.4% 19.2% 27.7%

表 3-2 燃料インベントリ(2/2) [核不拡散性向上炉心]

ELEMENT	平衡サイクル初期、重量[kg]		Pu富化度 [Pu/HM]		内側炉心	外側炉心	合計
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	0.207	0.223	
U234	6.5	6.5	1.5	0.8	13.0	2.3	15.3
U235	47.4	50.8	99.6	62.0	98.2	161.5	259.7
U236	6.4	4.8	5.7	1.9	11.2	7.5	18.7
U238	23526.9	22334.5	39962.1	22804.6	45861.4	62766.7	108628.1
Np237	422.8	510.6	106.8	65.0	933.4	171.8	1105.2
Pu238	296.9	289.1	65.5	33.2	586.0	98.7	684.7
Pu239	3340.0	3502.3	1726.6	784.9	6842.4	2511.5	9353.9
Pu240	1917.3	2033.2	559.9	293.2	3950.5	853.1	4803.6
Pu241	209.7	194.3	187.7	109.4	403.9	297.0	700.9
Pu242	582.6	638.8	147.2	82.5	1221.5	229.7	1451.1
Am241	217.4	191.9	76.1	47.2	409.4	123.3	532.7
Am242m	7.8	5.3	1.6	0.6	13.1	2.2	15.2
Am243	88.2	71.0	32.6	17.8	159.1	50.4	209.5
Cm242	8.3	4.9	1.5	0.5	13.2	1.9	15.2
Cm243	0.8	0.3	0.1	0.0	1.1	0.1	1.2
Cm244	27.5	15.9	11.7	5.5	43.3	17.1	60.5
Cm245	3.3	1.8	0.7	0.2	5.2	0.9	6.1
Cm246	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3
U合計	23587.2	22396.6	40068.8	22869.2	45983.8	62938.0	108921.8
Np合計	422.8	510.6	106.8	65.0	933.4	171.8	1105.2
Pu合計	6346.4	6657.8	2686.8	1303.2	13004.2	3990.0	16994.2
Am合計	313.4	268.2	110.3	65.6	581.6	175.8	757.4
Cm合計	40.1	23.0	14.0	6.1	63.1	20.1	83.2
HM合計	30710.0	29856.1	42986.7	24309.1	60566.1	67295.8	127861.9
シブ化FP	2274.1	1556.4	471.5	121.2	3830.5	592.7	4423.2
随伴FP	127.1	120.9	0.0	0.0	248.1	0.0	248.1
FP合計	2401.2	1677.4	471.5	121.2	4078.6	592.7	4671.3

ELEMENT	平衡サイクル末期、重量[kg]		Pu富化度 [Pu/HM]		内側炉心	外側炉心	合計
	内側炉心	外側炉心	軸ブラ	径ブラ	0.212	0.225	
U234	10.7	11.0	2.6	1.4	21.6	4.0	25.6
U235	32.8	40.1	85.6	57.2	72.9	142.8	215.7
U236	9.5	7.3	8.8	3.0	16.8	11.8	28.6
U238	22307.3	21569.2	39177.3	22582.4	43876.5	61759.7	105636.2
Np237	312.7	419.5	95.7	61.4	732.2	157.0	889.2
Pu238	328.6	321.9	74.2	36.5	650.5	110.7	761.2
Pu239	3199.2	3337.9	2131.7	918.2	6537.2	3050.0	9587.1
Pu240	1896.6	2009.8	610.6	302.9	3906.4	913.5	4819.9
Pu241	245.8	222.1	162.2	95.3	467.9	257.4	725.4
Pu242	540.6	604.8	147.6	82.7	1145.4	230.3	1375.8
Am241	177.5	175.2	83.5	54.3	352.7	137.8	490.5
Am242m	10.4	7.6	2.5	1.0	18.0	3.5	21.5
Am243	104.9	87.4	33.9	18.2	192.3	52.1	244.4
Cm242	10.3	6.2	2.0	0.7	16.5	2.7	19.2
Cm243	1.0	0.5	0.1	0.0	1.5	0.2	1.7
Cm244	42.7	24.9	13.5	5.8	67.6	19.3	86.9
Cm245	5.3	2.7	1.2	0.3	7.9	1.5	9.5
Cm246	0.4	0.2	0.1	0.0	0.6	0.1	0.6
U合計	22360.3	21627.6	39274.3	22644.0	43987.8	61918.2	105906.1
Np合計	312.7	419.5	95.7	61.4	732.2	157.0	889.2
Pu合計	6210.9	6496.5	3126.3	1435.7	12707.4	4562.0	17269.4
Am合計	292.9	270.1	120.0	73.4	563.0	193.4	756.4
Cm合計	59.7	34.4	16.9	6.8	94.2	23.7	117.9
HM合計	29236.5	28848.2	42633.1	24221.3	58084.7	66854.4	124939.0
シブ化FP	3747.6	2564.3	825.1	209.1	6311.9	1034.1	7346.0
随伴FP	127.1	120.9	0.0	0.0	248.1	0.0	248.1
FP合計	3874.7	2685.3	825.1	209.1	6560.0	1034.1	7594.1

表 3-3 制御棒価値 [核不拡散性向上炉心]

単位：%Δk/kk'

項目	主炉停止系制御棒	後備炉停止系制御棒	
	ワンロッドスタック時	全数挿入時	ワンロッドスタック時
ノミナル値*1	6.8	2.3	2.0
最小値*2	6.2	2.1	1.8

*1 群縮約、ランピング、輸送及びメッシュの各補正因子を考慮した値

補正の方法は、主及び後備炉停止系制御棒全数挿入時の制御棒価値計算値が、補正を考慮したノミナル値と一致するようにB₄Cの原子数密度を希釈（希釈率：0.43）することで行った。

*2 制御棒価値の予測誤差9%（3σ）を考慮し、ノミナル値に0.91をかけた値

表 3-4 制御反応度収支 [核不拡散性向上炉心]

単位：% Δk/kk'

項目	主炉停止系制御棒		後備炉停止系制御棒	
	ワンドロッドスタック時	全数挿入時	ワンドロッドスタック時	全数挿入時
(1) 計画余剰反応度	3.4	0.8	0.6	0.6
a. 出力補償	(0.8)	(0.8)	(0.6)	(0.6)
b. 燃焼補償	(2.4)	-	-	-
c. 運転余裕	(0.2)	-	-	-
(2) 余剰反応度不確かさ	0.5	0.2	0.1	0.1
a. 臨界予測誤差	(0.0)	-	-	-
b. 出力補償予測誤差	-	(0.12)	(0.09)	(0.09)
c. 燃料製作公差	(0.39)	-	-	-
d. 燃料交換余裕	(0.20)	-	-	-
(3) 事故時投入反応度	-	0.2	0.2	0.2
(4) 必要制御反応度合計	3.9	1.2	0.9	0.9
(5) 制御棒価値	6.2	2.1	1.8	1.8
(6) 炉停止余裕	2.3	0.9	0.9	0.9

*1 出力補償反応度は、燃料のドープラ反応度に炉心各部の熱膨張効果を加えて評価

表 3-5 反応度特性 (平衡サイクル末期 定格出力時) [核不拡散性向上炉心]

反応度特性	単位	炉心部			ブラケット部			
		内側炉心	外側炉心	合計	軸方向(上部)	軸方向(下部)	径方向	合計
ボイド反応度 ^{*1}	\$	4.2 (4.2)	1.5 (1.5)	5.7 (5.7)	-	-	-	-
ドップラ係数 ^{*2}	T Δk/ΔT	-3.03E-03	-1.28E-03	-4.31E-03	-2.29E-04	-1.02E-03	-1.62E-04	-1.42E-03
密度係数	燃料	1.77E-01	9.44E-02	2.71E-01	7.00E-03	9.08E-03	2.33E-03	1.84E-02
	構造材	-5.63E-02	-2.15E-02	-7.77E-02	1.06E-03	-2.59E-03	1.97E-04	-1.34E-03
	冷却材 ^{*3}	-1.99E-02	-7.32E-03	-2.72E-02	3.18E-04	-6.92E-04	1.16E-04	-2.58E-04
形状係数	軸方向	0.0837	0.0447	0.1284	-	-	-	-
	径方向	0.0201	0.0107	0.0309	-	-	-	-

*1 燃料集合体非均質効果等の補正 (0.86) を含む。括弧内の値は全炉心ボイドとした場合の値。

*2 燃料のみの値で、非均質断面積補正 (1.05) を含む。

*3 集合体間ギャップ及び内部ダクト内の冷却材の寄与も含む。

注1) 構造材のドップラ係数(非均質断面積補正を含まず)は以下の通り。

構造材合計	単位	内側炉心	外側炉心	炉心部合計
被覆管	T Δk/ΔT	-9.62E-04	-4.02E-04	-1.36E-03
ラップ管	同上	-5.72E-04	-2.39E-04	-8.11E-04
	同上	-3.90E-04	-1.63E-04	-5.52E-04

表 3-6 温度係数 (平衡サイクル末期 定格出力時) [核不拡散性向上炉心]

単位: $\times 10^{-6} \Delta k/kk' / ^\circ C$

各部	炉心部			ブランクケット部			
	内側炉心	外側炉心	合計	軸方向(上部)	軸方向(下部)	径方向	合計
燃料	-1.6	-0.8	-2.4	-0.07	-0.09	-0.02	-0.11
被覆管	1.5	0.6	2.1	-0.03	0.05	-0.01	0.05
ラップ管	0.5	0.2	0.7	-0.01	0.02	0.00	0.02
下部支持板	-6.1	-3.3	-9.4	-0.29	-0.31	-0.09	-0.40
冷却材*1	5.7 (4.9)	2.1 (1.8)	7.7 (6.6)	-0.09 (-0.08)	0.19 (0.16)	-0.03 (-0.03)	0.16 (0.14)
ドップラー*2	-2.0	-1.0	-3.0	-0.3	-1.4	-0.2	-1.6

*1 集合体間ギャップ及び内部ダクト内の冷却材の寄与も含む。
 括弧内の値は、燃料集合体非均質効果等の補正 (0.86) を含む。
 *2 燃料のみ含み、構造材等の寄与は含まず。

表 3-7 動特性パラメータ（平衡サイクル末期） [核不拡散性向上炉心]

項 目		評価値
実効遅発中性子割合	β_1	0.00007
	β_2	0.00067
	β_3	0.00059
	β_4	0.00117
	β_5	0.00054
	β_6	0.00016
	合計	0.00320
遅発中性子先行核 崩壊定数 [s^{-1}]	λ_1	0.01
	λ_2	0.03
	λ_3	0.13
	λ_4	0.34
	λ_5	1.38
	λ_6	3.77
即発中性子寿命 [μs]		0.36

表 3-8 燃料仕様 [核不拡散性向上炉心]

項 目		単位	仕様
炉心燃料集合体	燃料集合体型式	-	改良内部ダクト型 (集合体コーナ部燃料要素16本削除)
	燃料材料	-	軽水炉取出回収PU添加MOX燃料
	構造材材料 (被覆管/ラップ管)	-	ODS/PNC-FMS
	燃料要素本数/集合体	本	255
	炉心高さ	mm	900
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	mm	550(250/300)
	燃料要素外径	mm	10.4
	被覆管肉厚	mm	0.71
	燃料要素配列ピッチ	mm	11.5
	燃料要素配列ピッチ/燃料要素外径	-	1.106
	ワイヤスペーサ径	mm	1.03
	ワイヤスペーサ巻付ピッチ	mm	200
	ガスプレナム長 (上部/下部)	mm	100/1050
	燃料要素全長	mm	2690
	内部ダクト		
	ダクト厚	mm	2.0
ダクト外面の1辺の長さ	mm	46.0	
削除される燃料要素本数	本	16	
径方向ブランケット燃料集合体	燃料集合体型式	-	正三角配列型
	燃料材料	-	Pu添加劣化ウラン
	構造材材料 (被覆管/ラップ管)	-	ODS/PNC-FMS
	燃料要素本数/集合体	本	217
	径方向ブランケット燃料高さ	mm	1450
	燃料要素外径	mm	11.7
	被覆管肉厚	mm	0.415
	燃料要素配列ピッチ	mm	12.83
	燃料要素配列ピッチ/燃料要素外径	-	1.097
	ワイヤスペーサ径	mm	1.07
	ワイヤスペーサ巻付ピッチ	mm	200
	ガスプレナム長 (上部/下部)	mm	100/1050
燃料要素全長	mm	2690	
共通事項	ラップ管肉厚	mm	5.0
	ラップ管内対面間距離	mm	191.6
	集合体間ギャップ	mm	4.4
	集合体配列ピッチ	mm	206.0

表 3-9 炉心流量配分と熱流力特性及び被覆管 CDF [核不拡散性向上炉心]

領域	流量領域	集合体数	集合体流量 [kg/s]	領域流量 [kg/s]	被覆管最高 温度*1 [°C]	バンドル部 圧力損失 [MPa]	被覆管 CDF
内側炉心	1	64	34.8	2227.2	677	0.21	0.48
	2	54	31.5	1701.0	686	0.18	0.49
	3	94	30.5	2867.0	686	0.17	0.50
	4	76	27.5	2090.0	692	0.15	0.49
	小計	288	-	8885.2	-	-	-
外側炉心	5	28	29.7	831.6	700	0.16	0.17
	6	70	27.0	1890.0	700	0.14	0.14
	7	92	23.7	2180.4	699	0.12	0.18
	8	84	19.0	1596.0	700	0.09	0.016
	小計	274	-	6498.0	-	-	-
径方向 ブランケット	9	42	13.1	550.2	698	-	-
	10	54	9.1	491.4	697	-	-
	小計	96	-	1041.6	-	-	-
合計		658	-	16424.8 *2	-	-	-

*1 肉厚中心、ホットスポット温度

*2 1次系流量の91.3% (燃料集合体に配分可能な流量=95.5%)

表 3-10 径方向ブランケット外側での中性子束の比較 (炉心中心高さ位置)

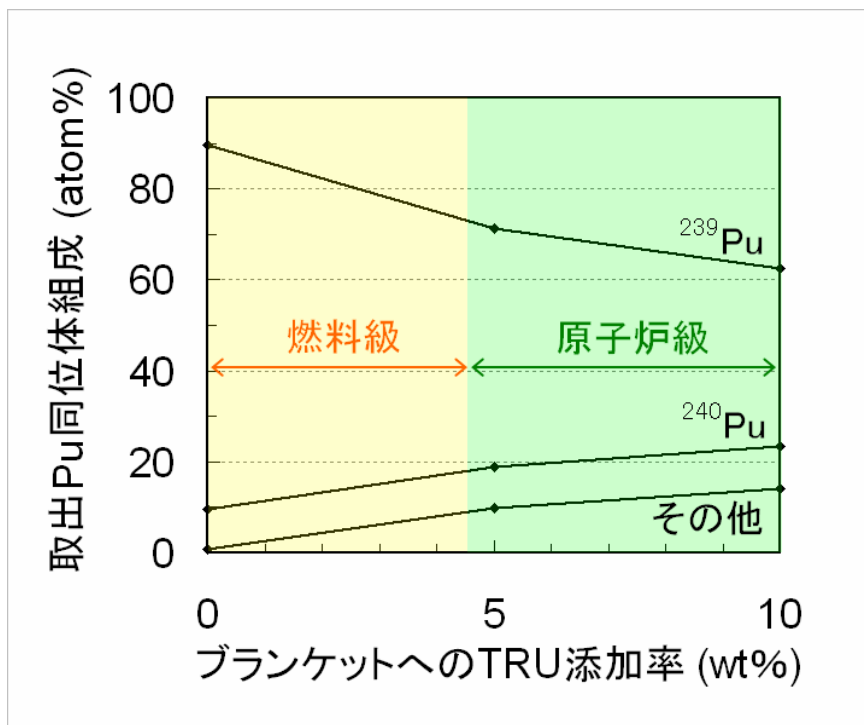
	中性子エネルギー	中性子束 ($n/(cm^2 \cdot s)$) (EOEC)	比較 ([A]に対する増減)
[A] フェーズII 代表炉心	全中性子束	3.16E+14	
	0.1MeV以上	1.17E+14	
	1.0MeV以上	2.32E+13	
[B] 核不拡散性向上炉心	全中性子束	3.09E+14	-2.4%
	0.1MeV以上	1.38E+14	17.6%
	1.0MeV以上	2.95E+13	27.1%
[C] MA 含有燃料炉心	全中性子束	2.50E+14	-20.9%
	0.1MeV以上	9.69E+13	-17.5%
	1.0MeV以上	1.90E+13	-18.1%

表 3-11 下部軸方向ブランケット下端での中性子束の比較

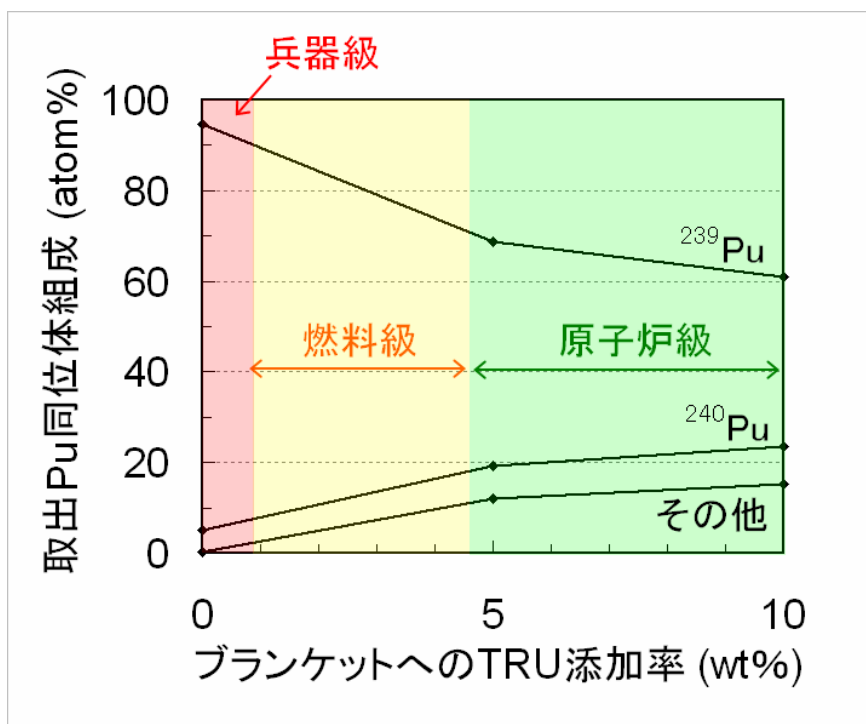
	中性子エネルギー	径方向最大中性子束 ($n/(cm^2 \cdot s)$) (EOEC)	比較 ([A]に対する増減)
[A] フェーズII 代表炉心	全中性子束	1.02E+15	
	0.1MeV以上	3.92E+14	
	1.0MeV以上	7.93E+13	
[B] 核不拡散性向上炉心	全中性子束	9.14E+14	-10.1%
	0.1MeV以上	3.63E+14	-7.3%
	1.0MeV以上	7.51E+13	-5.3%
[C] MA 含有燃料炉心	全中性子束	1.03E+15	1.5%
	0.1MeV以上	4.01E+14	2.4%
	1.0MeV以上	8.14E+13	2.6%

表 3-12 上部軸方向ブランケット上端での中性子束の比較

	中性子エネルギー	径方向最大中性子束 ($n/(cm^2 \cdot s)$) (EOEC)	比較 ([A]に対する増減)
[A] フェーズII 代表炉心	全中性子束	3.92E+14	
	0.1MeV以上	1.63E+14	
	1.0MeV以上	3.22E+13	
[B] 核不拡散性向上炉心	全中性子束	3.79E+14	-3.2%
	0.1MeV以上	1.70E+14	4.4%
	1.0MeV以上	3.55E+13	10.1%
[C] MA 含有燃料炉心	全中性子束	5.33E+14	36.2%
	0.1MeV以上	2.37E+14	45.3%
	1.0MeV以上	4.75E+13	47.4%

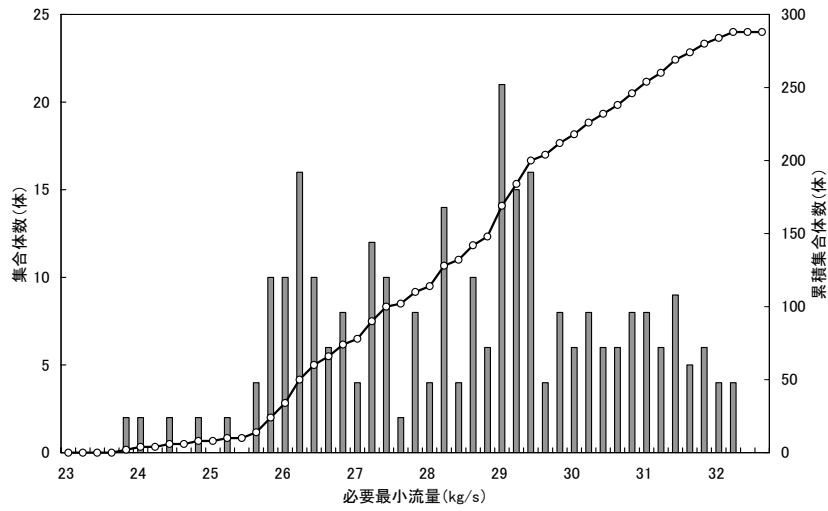


(a) 軸方向ブランケット

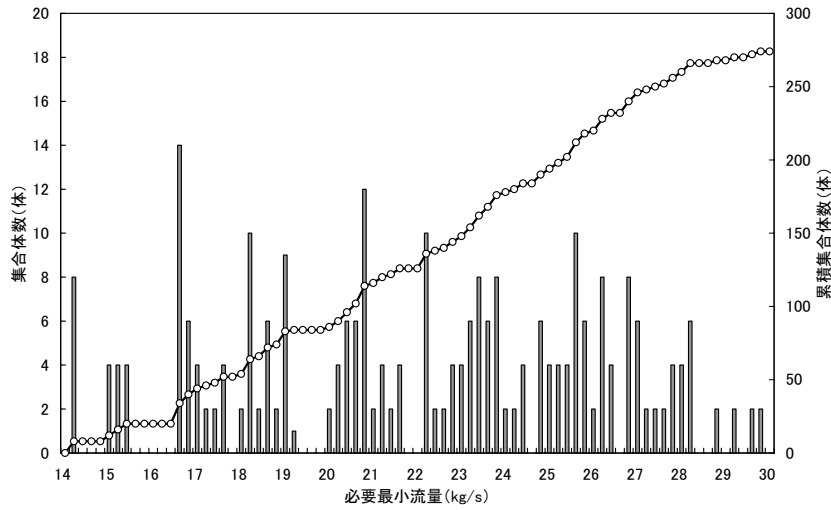


(b) 径方向ブランケット

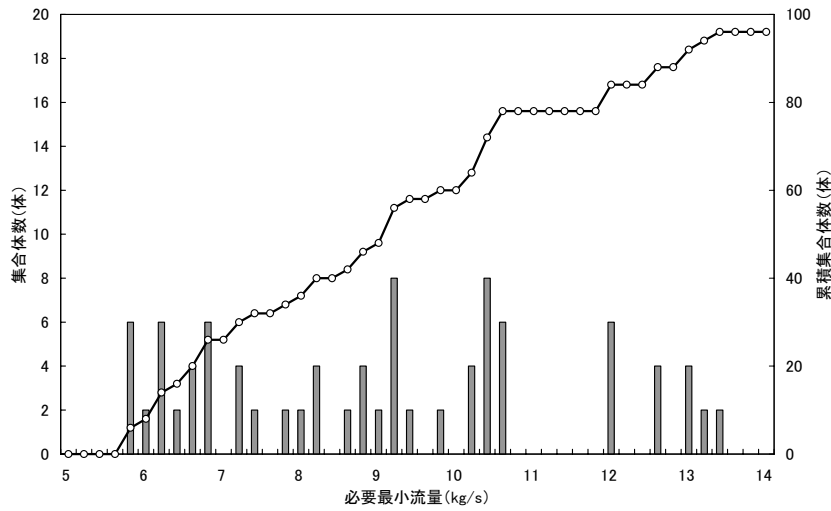
図 3-1 ブランケットへの TRU 添加による取出 Pu 同位体組成の変化



(a) 内側炉心燃料集合体

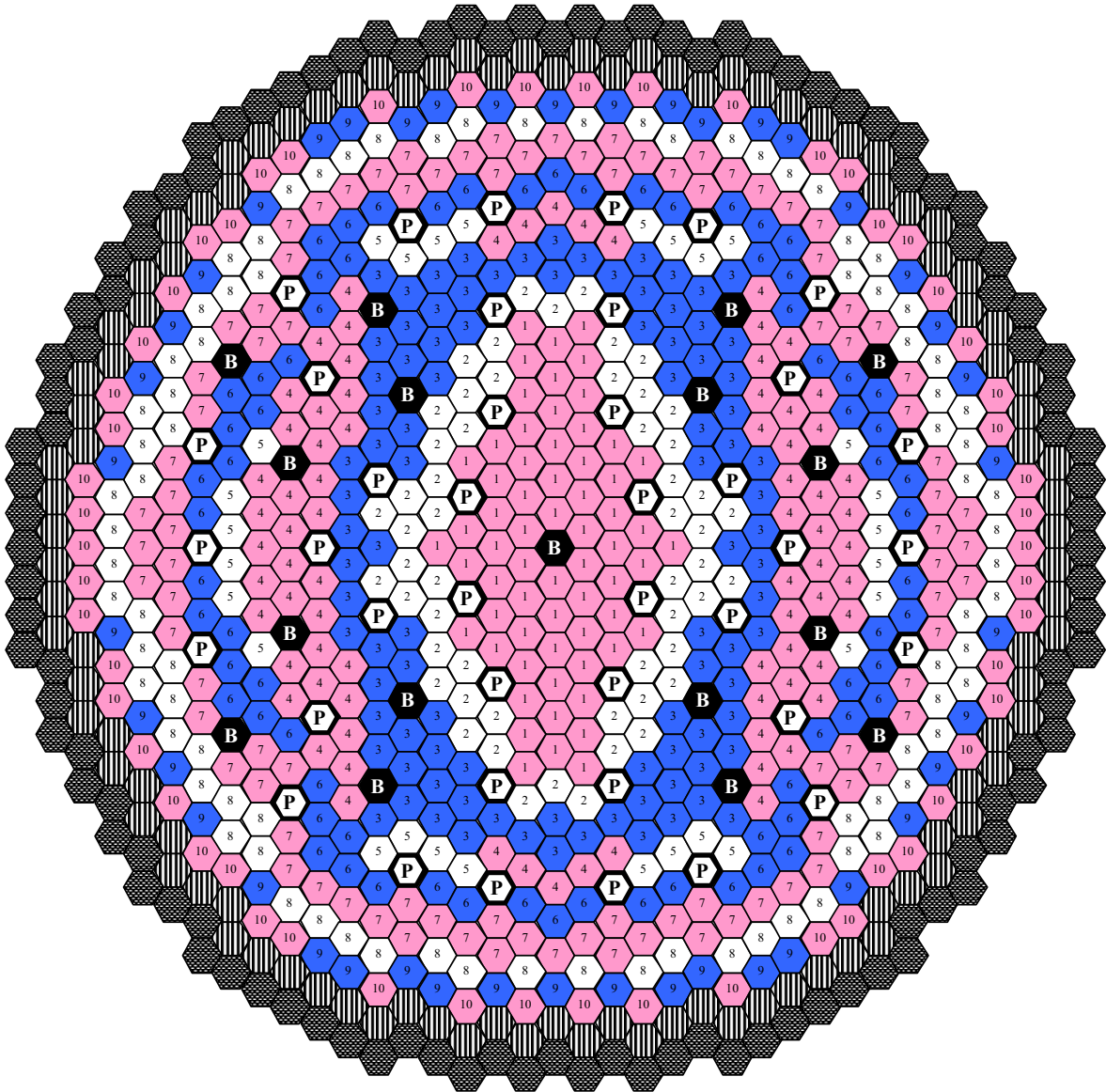


(b) 外側炉心燃料集合体



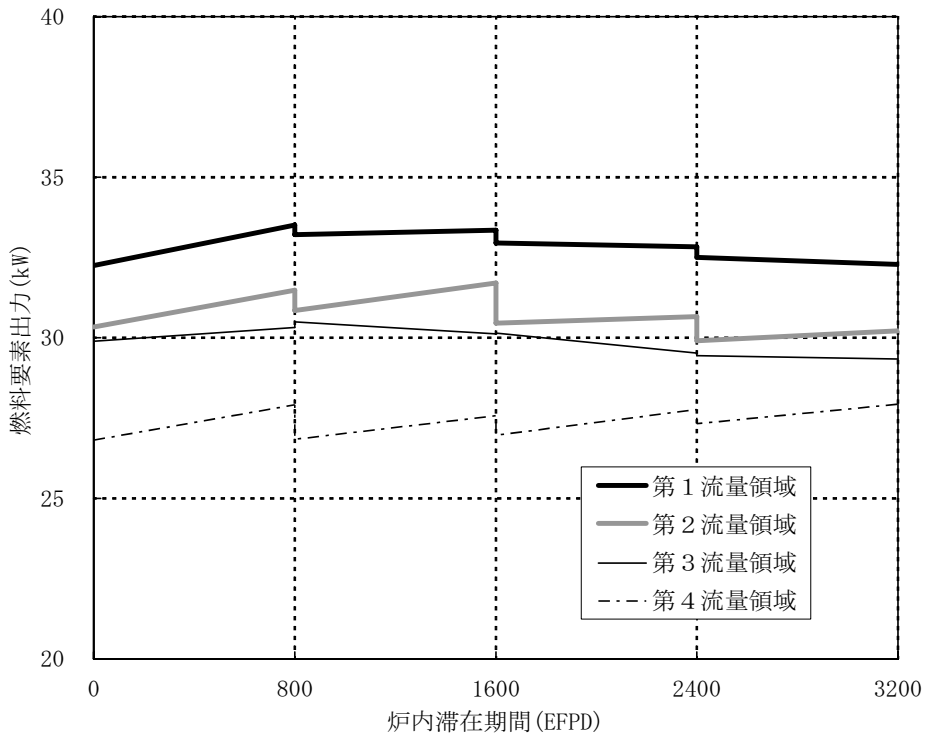
(c) 径方向ブランケット燃料集合体

図 3-2 燃料集合体必要最少流量の度数分布 [核不拡散性向上炉心]

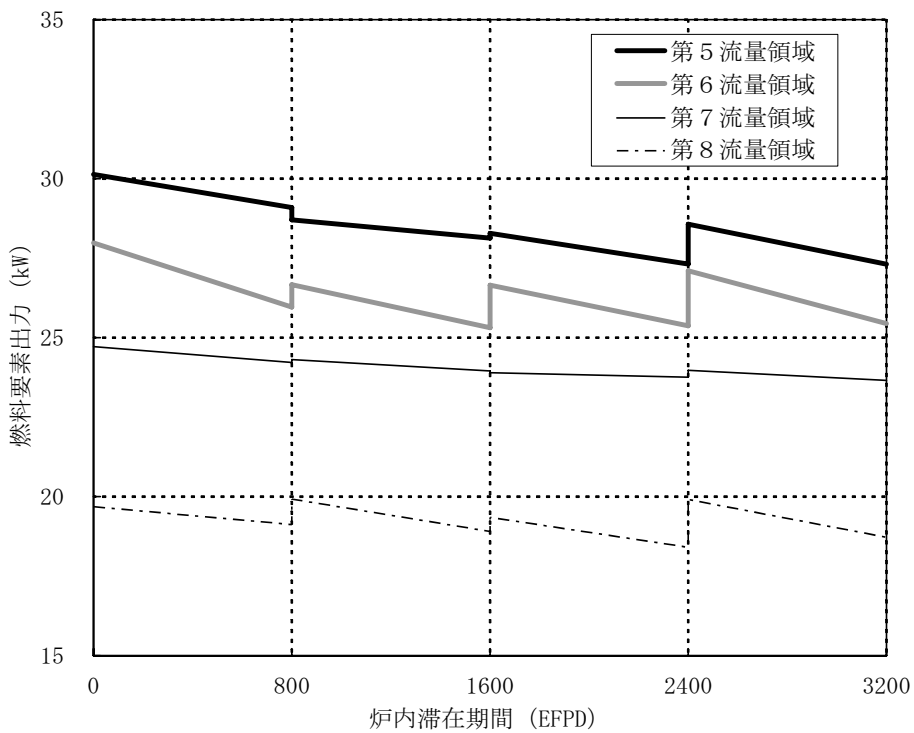


内側炉心 (288 体)		外側炉心 (274 体)		径方向ブランケット (96 体)	
第 1 流量領域	64 体	第 5 流量領域	28 体	第 9 流量領域	42 体
第 2 流量領域	54 体	第 6 流量領域	70 体	第 10 流量領域	54 体
第 3 流量領域	94 体	第 7 流量領域	92 体		
第 4 流量領域	76 体	第 8 流量領域	84 体		

図 3-3 炉心流量領域区分 [核不拡散性向上炉心]

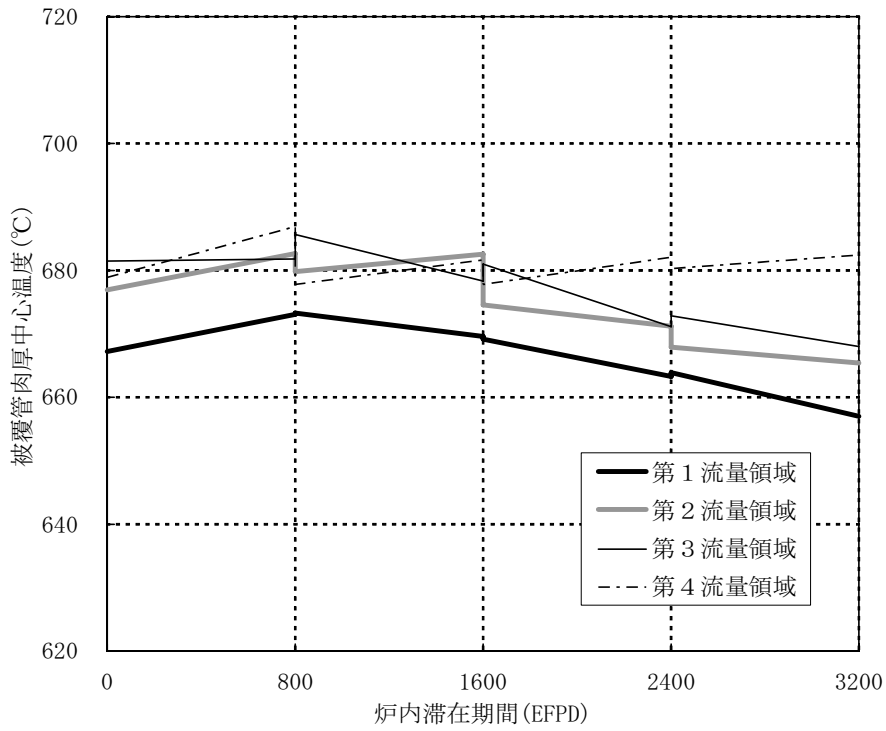


(a) 内側炉心燃料

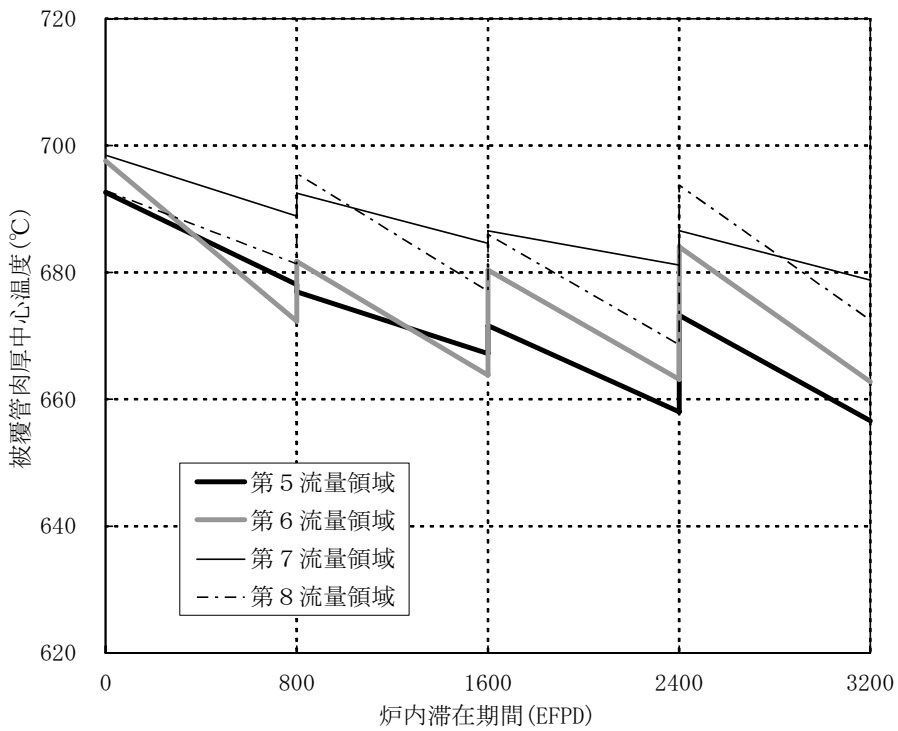


(b) 外側炉心燃料

図 3-4 CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴 [核不拡散性向上炉心]



(a) 内側炉心燃料



(b) 外側炉心燃料

図 3-5 燃料ピンの被覆管最高温度(肉厚中心)履歴 【核不拡散性向上炉心】

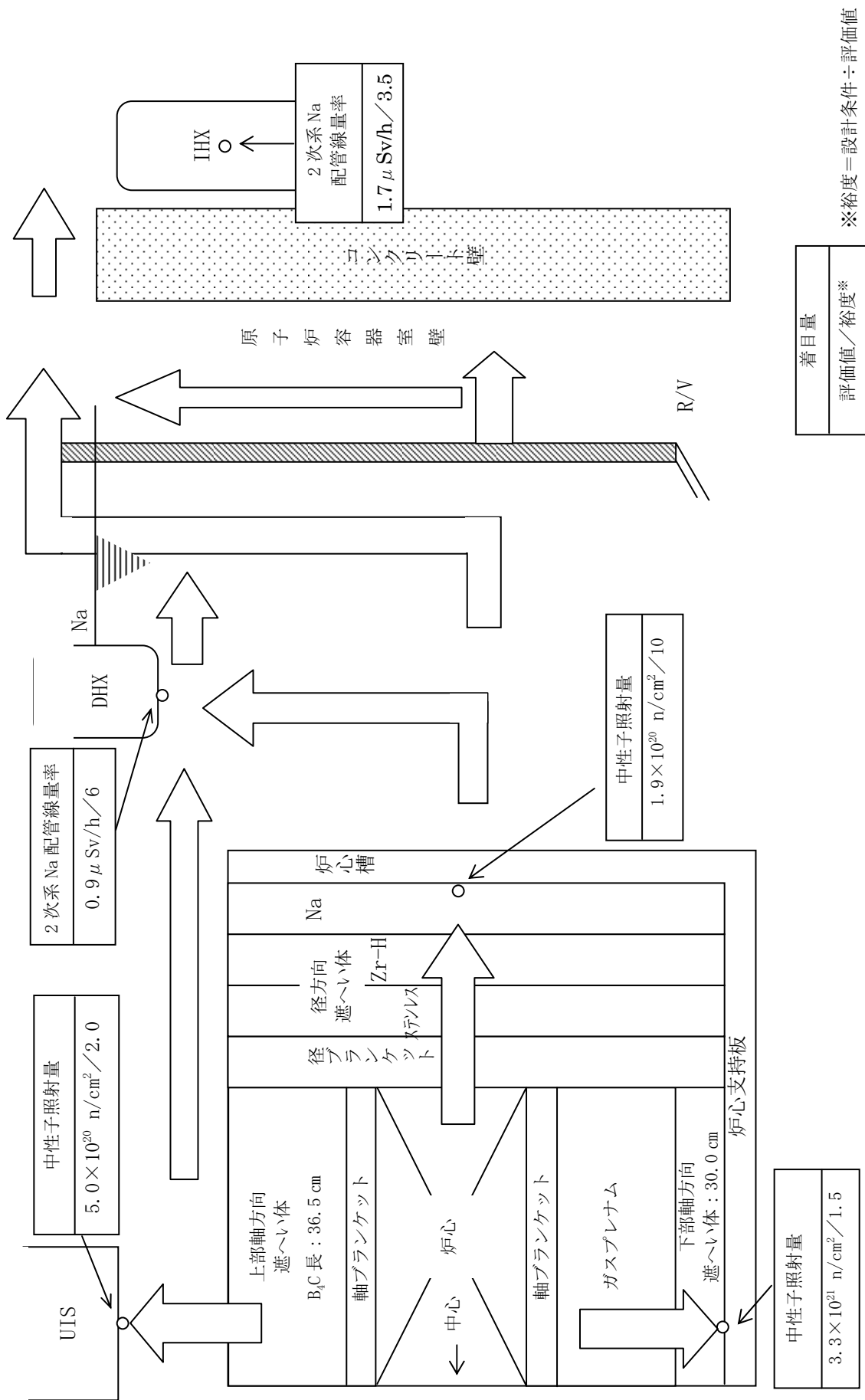


図 3-6 フェーズ II 代表炉心の炉心周り遮へい検討結果

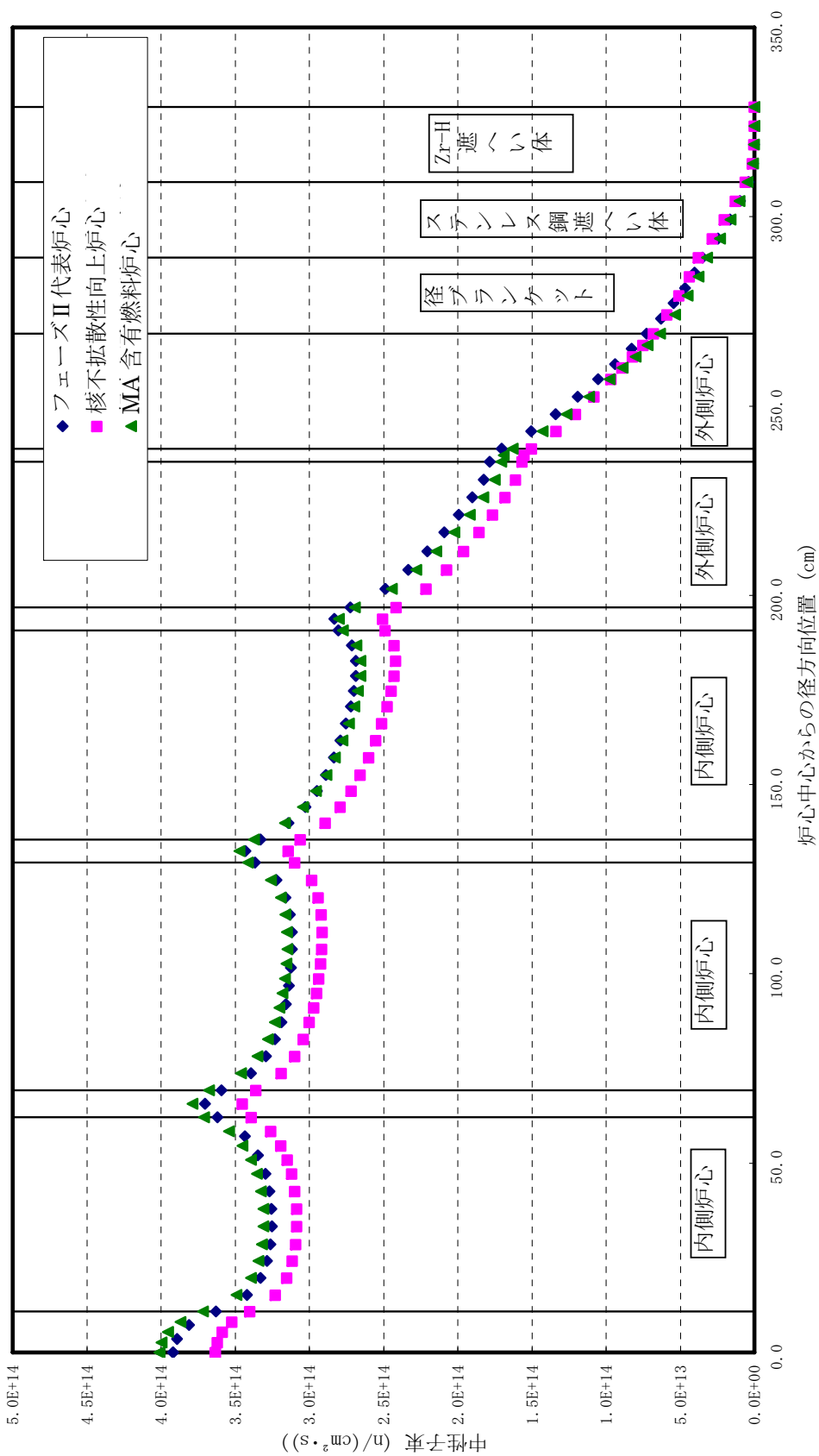


図 3-7 径方向高速中性子束分布の比較 (下部軸方向ブランケット下端、0.1MeV 以上)

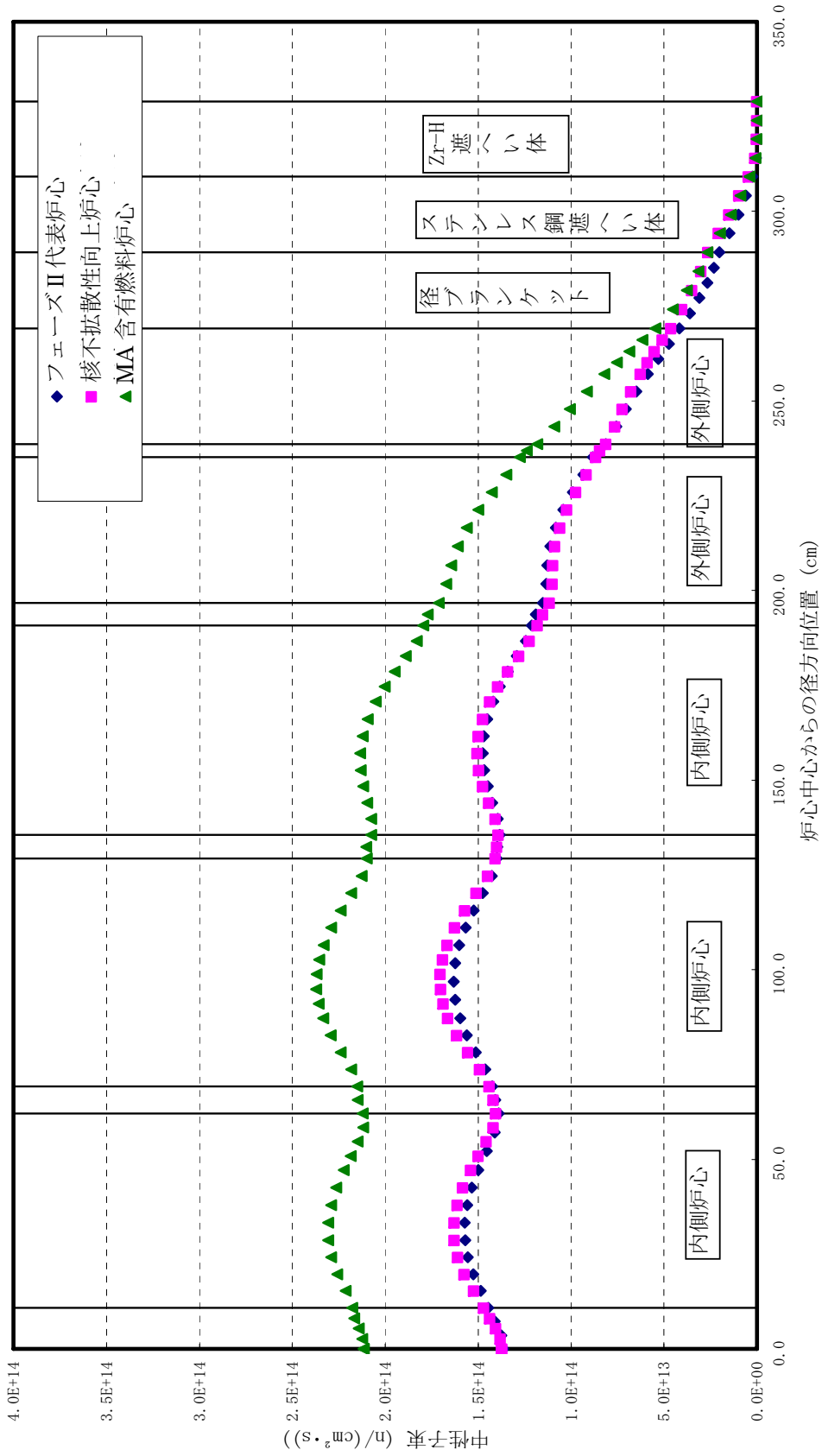


図 3-8 径方向高速中性子束分布の比較 (上部軸方向ブランケット上端、0.1MeV 以上)

4. おわりに

FaCT の主概念であるナトリウム冷却炉大型 MOX 燃料高内部転換型炉心に関する設計検討として、本年度（2006 年度）は FS フェーズⅡにおいて構築した炉心を基に、「MA 含有燃料を用いた炉心」と「ブランケットへの Pu 添加による核不拡散性向上炉心」の検討を行った。

MA 含有燃料を用いた炉心の検討では、MA 含有率の高い ALWR 使用済燃料の TRU を用いた炉心を構築した。構築した炉心は、FS フェーズⅡの炉心に対して上部軸方向ブランケット 5 cm 短縮、下部ガスプレナム長さ 5 cm 伸長の変更を加えたのみである。

核特性としては、Pu 富化度が内側炉心が 19.6 wt%、外側炉心が 22.1 wt%であり、増殖比が約 1.1 である。取出平均燃焼度は炉心部が 146 GWd/t、ブランケット燃料を含む全炉心が 93 GWd/t、高速中性子照射量は $5.0 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ であり、いずれも設計条件を満足している。最大線出力は内側炉心が 411 W/cm、外側炉心が 395 W/cm、ナトリウムボイド反応度は 5.9 \$ であり設計目安を満足している。また、制御反応度収支は主炉停止系制御棒、後備炉停止系制御棒ともに十分な炉停止余裕を持って成立の見通しである。

炉心流量領域は、内側及び外側炉心がそれぞれ 4 領域、径方向ブランケットが 2 領域の合計 10 領域である。被覆管肉厚中心温度の最高は 700°C、燃料ピンバンドル部圧力損失の最大は 0.22 MPa であり設計条件を満足している。また、炉心及び径方向ブランケット燃料への流量は 16,756 kg/s（1 次系冷却材流量の 93.1%）であり、炉心に配分可能な流量 95.5%に対して 2.4%の余裕を有している。また、被覆管の CDF（通常運転時）は内側炉心の最大が 0.45、外側炉心の最大が 0.06 であり、いずれも設計条件を満足している。

ブランケットへの Pu 添加による核不拡散性向上炉心の検討では、上記の MA 含有燃料を用いた炉心をベースに炉心設計検討を行い、ブランケットへの TRU 添加率を最大でも 5 wt%とすれば、軸方向ブランケット、径方向ブランケット共に、平均 Pu 組成を原子炉級（ ^{240}Pu 同位体組成比で >18%）に保つことができることを見出した。必要な炉心・燃料仕様の変更は、炉心平均比出力及び炉心部取出平均燃焼度の設計条件を満足させるための炉心高さの低減（100 → 90 cm）、増殖比を 1.1 程度とするための軸方向ブランケットの伸長（上下合わせて 35 → 55 cm）である。初装荷核分裂性 Pu 重量が増加するものの、核特性、制御反応度収支はいずれも設計条件を満足する。

炉心流量領域は、内側及び外側炉心がそれぞれ 4 領域、径方向ブランケットが 2 領域の合計 10 領域である。燃料要素全長を変えないよう下部ガスプレナム長を 5 cm 短縮したが、ブランケットの出力分担率増加による出力分布平坦化によって、被覆管肉厚中心最高温度 700°C 以下、燃料ピンバンドル部圧力損失 0.2 MPa 程度以下、被覆管の CDF（通常運転時）0.5 以下を同時に満足する流量配分の可能な見通しが得られた。

なお、本炉心ではブランケットにおける出力分担率が増加するが、炉心周りの遮へい成立性は確保できる見通しである。

謝辞

本ナトリウム冷却炉 MOX 燃料炉心の設計・評価については、JAEA・原電（9 電力会社、電源開発株式会社及び原電の代表）が立案した検討方針に従って、ARTECH 大久保 良幸 氏、三菱重工業 日比 宏基 氏、菅 太郎 氏に解析作業（炉心・燃料設計、熱流力設計、燃料健全性等）を担当して頂きました。また、(株)NESI 曾我 彰 氏には計算作業を担当して頂きました。

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頂きました。この場を借りて、謝意を表します。

参考文献

- [1] 此村 守, 他, 「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズII技術検討書(1) 原子炉プラントシステム」, JAEA-Research 2006-042, (2006).
- [2] 小川 隆, 他, 「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (MOX 燃料炉心) -2005 年度報告-」, JAEA-Research 2006-061, (2006).
- [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, (2005).
- [4] 水田 俊治, 他, 「ODS フェライト鋼被覆管の設計用関係式の検討」, JNC TN9400 2000-048, (2000).
- [5] 「高速増殖炉サイクル実用化研究開発 開発目標と設計要求について」, 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 開発目標検討タスクフォース, (2007 年 8 月).
- [6] J. C. Mark, “Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium,” *Science and Global Security*, Vol. 4, pp. 111-128 (1993).
- [7] 「原子炉級プルトニウムと兵器級プルトニウム 調査報告書」, 社団法人 原子燃料政策研究会, (2001).
- [8] B. Pellaud, “Proliferation Aspects of Plutonium Recycling,” *Journal of Nuclear Materials Management*, Vol. XXXI, No.1, pp. 30-38 (2002).

This is a blank page.

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

表5. SI 接頭語

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

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

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻¹
表面張力	ニュートン毎メートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方メートル	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ジュール毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

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

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

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

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

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1um=10 ⁻⁶ m



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています