



# MOX 燃料棒とウラン燃料棒を併用した 革新的水冷却炉増殖型燃料集合体の概念検討

Combined Use of MOX and UO<sub>2</sub> Fuel Rods  
in Fuel Assembly Designs for Plutonium Conservation in FLWR

内川 貞夫 中野 佳洋 大久保 努

Sadao UCHIKAWA, Yoshihiro NAKANO and Tsutomu OKUBO

次世代原子力システム研究開発部門  
炉開発ユニット

SFR Design Synthesis Unit  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

June 2010

本レポートは独立行政法人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>)  
より発信されています。

独立行政法人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  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

## MOX燃料棒とウラン燃料棒を併用した 革新的水冷却炉増殖型燃料集合体の概念検討

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 炉開発ユニット\*

内川 貞夫、中野 佳洋、大久保 努

(2010年3月2日 受理)

革新的水冷却炉(FLWR)は、発電炉としての経験・実績が豊富な軽水炉技術に立脚したBWRタイプの水冷却高速炉であり、同一炉心構成のもとで燃料集合体の仕様を変更することにより、将来の核燃料サイクル環境の変化に対応した柔軟かつ高度なプルトニウム利用をめざしている。第1ステップでは、軽水炉サイクルインフラを活用したプルトニウムの集中利用を、第2ステップでは、MOX燃料再処理等の高速炉サイクルインフラを利用した増殖による持続的なプルトニウムの多重リサイクル利用を実現する。

本研究では、プルサーマル利用により確立される軽水炉燃料サイクル技術に立脚し、FLWRの第1ステップにおいて転換比を1.0近傍まで高めて効率的なプルトニウム利用を実現する燃料集合体概念として、MOX燃料棒と $UO_2$ 燃料棒を集合体内で非均質(アイランド型)に配置した設計概念(FLWR/MIX)を構築し、その成立性を検討した。

(1) FLWR/MIX燃料集合体では、燃料集合体の外周部に配置する $UO_2$ 燃料棒の本数により、稠密格子燃料棒配列でのボイド反応度特性を制御することができ、MOX燃料棒のPu富化度やPu組成に対応して、炉心全体のボイド反応度係数を負に維持する柔軟な設計を実現できる。

(2) 使用するMOX燃料ペレットの最大Pu富化度をプルサーマル用MOX燃料加工施設での取扱可能範囲内としながら、ブランケットなしで核分裂性Pu残存比を1.0近傍まで高めることができる。

(3) 軸方向ブランケットを設置して核分裂性Pu残存比を1.05程度まで高めた炉心設計や、 $UO_2$ 燃料棒に軽水炉使用済燃料の再処理により得られる回収ウランを利用した設計が可能である。また、稠密格子 $UO_2$ 燃料集合体とFLWR/MIX燃料集合体から構成される部分MOX初装荷炉心の採用により、FLWR導入時に必要なPu量を低減することができる。

上記の特性により、本設計概念にもとづくFLWRは、六ヶ所再処理施設やMOX燃料加工施設等の軽水炉サイクルインフラを活用して、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへのスムーズかつ早期の移行の実現に貢献することができる。

**Combined Use of MOX and UO<sub>2</sub> Fuel Rods  
in Fuel Assembly Designs for Plutonium Conservation in FLWR**

Sadao UCHIKAWA, Yoshihiro NAKANO and Tsutomu OKUBO

SFR Design Synthesis Unit\*

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 2, 2010)

The FLWR is an innovative BWR-type reactor with hard neutron spectrum based on the well-experienced LWR technologies. It aims at effective and flexible utilization of uranium and plutonium resources by adopting a two-stage concept of core designs corresponding to the advancement of the fuel cycle technologies and related infrastructures. A new concept of the fuel assembly design named FLWR/MIX has been proposed for the first stage of FLWR to conserve plutonium effectively with a fissile-plutonium conversion ratio of around 1.0, keeping negative void reactivity characteristics. The enriched UO<sub>2</sub> fuel rods are arranged in the peripheral region of the assembly, surrounding the MOX fuel rods in the central region.

Performance evaluation shows that the FLWR/MIX concept is effective for controlling the void reactivity characteristics in the tight-lattice fuel rod configuration and promising under the framework of the UO<sub>2</sub> and MOX fuel technologies and related infrastructures which have been established for the current LWR-MOX utilization. Some potentials of the FLWR/MIX concept have been also evaluated, which include the feasibility of higher conversion ratio enough for realization of sustainable fuel cycle, utilization of reprocessed uranium from LWR spent fuel, and partially MOX-loaded core with tight-lattice UO<sub>2</sub> fuel assemblies for operational flexibility.

On the basis of the results obtained, it is expected that the FLWR/MIX design can contribute to realize a smooth and speedy transition from the LWR fuel cycle to the FBR fuel cycle.

Keywords: FLWR, Light Water Reactor, Tight Lattice, Assembly Design, MOX Fuel, UO<sub>2</sub> Fuel, High Conversion, Breeding, Plutonium Management

---

\*Reorganized as JSFR Systems Development Planning Office from April 1st, 2010.

目 次

1. 緒言	-----	1
2. 燃料集合体及び炉心設計の基本的考え方	-----	3
2.1 設計目標	-----	3
2.2 要求事項	-----	3
2.2.1 プルサーマル用燃料製造加工施設の活用	-----	3
2.2.2 プルサーマルMOX燃料照射実績の活用	-----	4
2.3 MOX/UO <sub>2</sub> 燃料棒併用増殖型燃料集合体 (FLWR/MIX)	-----	4
2.4 FLWR/MIX燃料装荷炉心	-----	5
2.5 特性解析手法	-----	6
3. FLWR/MIX燃料装荷炉心の特性評価	-----	11
3.1 稠密格子体系におけるボイド反応度特性	-----	11
3.2 主要設計パラメータの炉心特性に及ぼす影響	-----	11
3.2.1 周辺配置UO <sub>2</sub> 燃料棒本数	-----	12
3.2.2 UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度	-----	13
3.2.3 Pu同位体組成	-----	13
4. FLWR/MIX設計概念にもとづく資源の柔軟な利用	-----	19
4.1 軽水炉燃料サイクルインフラを利用した増殖型運転	-----	19
4.2 高燃焼度・高転換型炉心	-----	19
4.3 回収ウランの利用	-----	20
5. 部分MOX炉心の検討	-----	23
5.1 部分MOX炉心の役割	-----	23
5.2 稠密格子UO <sub>2</sub> 燃料集合体	-----	23
5.3 部分MOX平衡サイクル炉心	-----	24
5.4 部分MOX初装荷炉心	-----	24
6. 結論	-----	29
参考文献	-----	29

Contents

1. Introduction .....	1
2. Concept of Fuel Assembly and Core Design .....	3
2.1 Design Goals .....	3
2.2 Design Requirements .....	3
2.2.1 Fuel fabrication using the current LWR-MOX infrastructure .....	3
2.2.2 Fuel design based on the current LWR-MOX data base .....	4
2.3 Design Concept of MOX/UO <sub>2</sub> Rod-mixed Fuel Assembly (FLWR/MIX) .....	4
2.4 Reactor Core Design of FLWR/MIX .....	5
2.5 Analysis Methods of Core Performance .....	6
3. Characteristics of FLWR/MIX Loading Core .....	11
3.1 Void Reactivity Characteristics in a Tight-lattice Configuration .....	11
3.2 Effects of Key Design Parameters on Core Performance .....	11
3.2.1 Number of the UO <sub>2</sub> Fuel Rods .....	12
3.2.2 Enrichment of the UO <sub>2</sub> Fuel Rods .....	13
3.2.3 Isotopic Composition of Plutonium .....	13
4. Application of the FLWR/MIX Design Concept for Flexible Plutonium Management in FLWR ..	19
4.1 Breeder-type Operation on the basis of the infrastructures of the LWR Fuel Cycle .....	19
4.2 Higher Burn-up / High Conversion Core .....	19
4.3 Utilization of Re-enriched UO <sub>2</sub> Reprocessed from LWR Spent Fuel .....	20
5. Partial MOX Loading Core with Tight-lattice UO <sub>2</sub> Fuel Assemblies .....	23
5.1 Roles of Partial MOX Loading Core .....	23
5.2 Tight-lattice UO <sub>2</sub> Fuel Assembly .....	23
5.3 Partial MOX Loading Core for the Equilibrium Cycle .....	24
5.4 Partial MOX Loading Core for the First Cycle .....	24
6. Concluding Remarks .....	29
References .....	29

表リスト

表 2.1	FLWR/MIX 燃料集合体の主要諸元	-----	7
表 2.2	大型 FLWR 炉心の主要諸元	-----	7
表 2.3	設計で想定した MOX 燃料のプルトニウム組成	-----	7
表 2.4	3次元炉心拡散計算でのエネルギー群構造	-----	8
表 2.5	燃料集合体無限増倍率計算結果の比較	-----	8
表 3.1	周辺配置 UO <sub>2</sub> 燃料棒本数の炉心性能への影響(1)－Pu 組成:Puf 含有率=57.5%	----	14
表 3.2	周辺配置 UO <sub>2</sub> 燃料棒本数の炉心性能への影響(2)－Pu 組成:Puf 含有率=67.5%	----	15
表 3.3	UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度の炉心性能への影響	-----	15
表 3.4	MOX 燃料棒組成の炉心性能への影響(1)－UO <sub>2</sub> 燃料棒 48 本	-----	16
表 3.5	MOX 燃料棒組成の炉心性能への影響(2)－UO <sub>2</sub> 燃料棒 66 本	-----	16
表 4.1	FLWR/MIX 燃料装荷炉心の主要諸元	-----	21
表 4.2	早期導入用 FLWR/MIX 燃料集合体の燃焼に伴う TRU 組成の比較	-----	21
表 5.1	UO <sub>2</sub> 燃料集合体を装荷した炉心の主要諸元	-----	25
表 5.2	部分 MOX 初装荷炉心用燃料集合体の仕様	-----	26
表 5.3	移行サイクルの燃料集合体数の変化と炉心解析結果	-----	26

図リスト

図 1.1	革新的水冷却炉 (FLWR) の代表炉心設計の概要	2
図 2.1	MOX/UO <sub>2</sub> 燃料棒併用増殖型燃料集合体 (FLWR/MIX) の断面図	9
図 2.2	大型 FLWR 炉心の断面図	9
図 2.3	炉心軸方向の計算体系図	9
図 2.4	炉心水平方向の計算体系図	10
図 2.5	燃料集合体格子燃焼計算の幾何形状モデル	10
図 3.1	稠密格子燃料集合体のボイド反応度特性	17
図 3.2	平衡サイクル炉心の燃料装荷パターン	17
図 3.3	FLWR/MIX 燃料集合体の燃料棒配置例	17
図 3.4	FLWR/MIX 燃料集合体のボイド反応度特性 (1)UO <sub>2</sub> 燃料棒本数の影響	18
図 3.5	FLWR/MIX 燃料集合体のボイド反応度特性 (2)UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度の影響	18
図 4.1	早期導入用 FLWR/MIX 燃料集合体の Pu 富化度分布	22
図 4.2	平衡サイクル炉心の出力分布	22
図 4.3	高燃焼度及び高転換比 FLWR/MIX 燃料集合体の Pu 富化度分布	22
図 4.4	回収ウラン (REU) 利用 FLWR/MIX 燃料集合体の Pu 富化度分布	22
図 5.1	稠密格子 UO <sub>2</sub> 燃料集合体の設計例	27
図 5.2	部分 MOX 平衡サイクル炉心の構成	27
図 5.3	部分 MOX 初装荷炉心の構成	27
図 5.4	移行サイクルにおける反応度変化	28
図 5.5	移行サイクル炉心における炉心径方向出力分布	28

## 1. 緒言

日本原子力研究開発機構が中心となって研究開発を進めている革新的水冷却炉（FLWR）は、商用発電炉としての経験・実績が豊富な軽水炉技術に立脚しつつ、MOX燃料を用いた稠密格子炉心を導入することにより、持続的なプルトニウムの多重リサイクル利用を目指したBWR型の水冷却炉である<sup>1)・2)</sup>。革新的水冷却炉は2つのステップの炉心概念から構成されており、同一炉心構成のもとで燃料集合体の仕様を変更することにより、天然ウラン需給環境の変化や燃料サイクル技術開発の進展等、将来の核燃料サイクル環境の変化に対応した柔軟かつ高度なプルトニウム利用を可能としている<sup>3)・5)</sup>。第1ステップは、軽水炉使用済燃料再処理施設やプルサーマル用MOX燃料加工施設等の軽水炉サイクルインフラを活用して、プルトニウムの有効かつ集中利用をめざすものである。第2ステップでは、今後計画されているMOX燃料再処理等の高速炉サイクルインフラを利用して、第1ステップでの集合体寸法や制御棒配置等の基本的な炉心構成を維持しつつ、集合体内の燃料棒本数や燃料棒間隔等を変更した増殖型炉心として、増殖による持続的なプルトニウムの多重リサイクル利用を実現する。

FLWR炉心の代表設計の概要を図1.1に示す。電気出力1356MWの大型FLWRを対象として検討が進められてきており、第1ステップでは、三角格子配列の燃料棒間隔を3.8mmとして現行軽水炉との技術的ギャップを小さくした転換比0.84のいわゆる高転換型炉心設計がまとめられている<sup>6)</sup>。第2ステップの増殖型炉心では、燃料棒間隔を1.3mmと狭めた稠密格子配列とし、軸方向内部ブランケット領域を設置した二重扁平炉心概念が採用され、プルトニウムの増殖（すなわち、1.0を越える転換比の達成）や多重リサイクル利用という目標を実現できるとの見通しが得られている<sup>7)</sup>。

一方、FLWRを実用化する上で重要な課題である稠密格子燃料集合体の除熱特性については、燃料棒間隔1.3mmの37本格子体系での限界出力試験がABWRと同じ高圧条件のもとで行われ、1.3mmの燃料棒間隔においても、十分な除熱性能を有することが確認されている<sup>8)</sup>。

本研究では、上記の稠密格子燃料集合体除熱性能試験の結果を踏まえて、FLWRの第1ステップにおいて転換比を1.0近傍まで高めて効率的なプルトニウム利用を実現する観点から、六ヶ所再処理施設やMOX燃料加工施設等の軽水炉サイクルインフラを活用して軽水炉サイクルから高速炉サイクルへのスムーズかつ早期の移行を実現可能とする、FLWR増殖型燃料集合体概念を提案し、その成立性と活用について検討することとした。

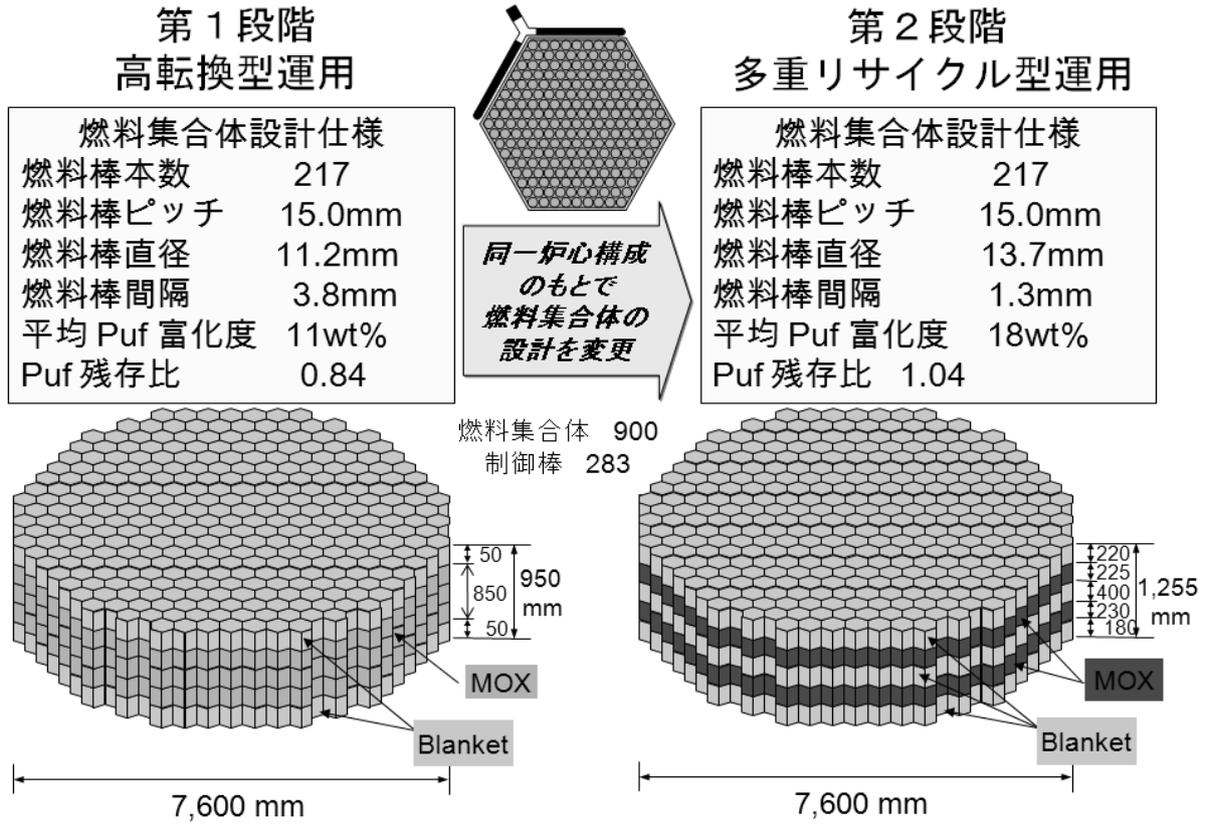


図1.1 革新的水冷却炉（FLWR）の代表炉心設計の概要

## 2. 燃料集合体及び炉心設計の基本的考え方

### 2.1 設計目標

本研究における燃料集合体および炉心概念の検討における主要な設計目標は、次の3点である。

- (1) 負のボイド反応度係数を確保すること、
- (2) 核分裂性プルトニウム残存比として、1.0を確保すること、
- (3) 現行軽水炉におけるMOX燃料利用（プルサーマル）で確立される炉心燃料技術、関連サイクル技術基盤に立脚して実現可能であること。

負のボイド反応度特性の維持は、BWR型の原子炉において安定でかつ安全な運転を実現する上で本質的に重要な条件である。核分裂性プルトニウム残存比は燃料装荷時と取出時の核分裂性プルトニウム量の比で定義される性能指標であり、上記(2)の条件は、運転によって核分裂性プルトニウムの量が減少することがなく、保存されることを意味する。新概念の早期かつスムーズな実用化のためには、実績のある技術・経験の活用が最も確実な方策であり、また、今後のプルサーマル利用で蓄積される技術および関連施設を軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期において活用することは高速炉サイクルへのスムーズな移行を実現する現実的な進め方であると考えられることから、本研究では、(3)の設計目標の達成に力点をおいて検討することとした。

### 2.2 要求事項

本研究では、プルサーマル燃料技術の活用という観点からの要求として、

- (1) プルサーマル用燃料製造加工施設を活用して、燃料および燃料集合体を製造できること、
  - (2) プルサーマルMOX燃料の照射実績データにもとづいて、燃料の設計が可能であること、
- の2点を設定した。これらの条件は、軽水炉の燃料加工施設の利用により、FLWR導入のための新たなインフラ整備に必要な投資を極力抑制すること、また研究炉等を利用した長期間かつ多額の費用を要する燃料照射試験によらずに導入を可能とすることを意図したものである。以下に本研究での具体的な要求事項をまとめる。

#### 2.2.1 プルサーマル用燃料製造加工施設の活用

燃料製造加工施設では、その施設で取扱可能な核燃料物質の組成や取扱量、製造加工プロセスを規定する条件が設定されている。本研究では、六ヶ所村に建設が決定している日本原燃(株)のMOX燃料製造加工施設(JMOX)での条件を参考して、設計で考慮すべきプルサーマル用燃料製造加工施設活用のための条件を検討した。

##### (1) MOX燃料ペレットの最大プルトニウム富化度

JMOXで製造可能なMOXペレットのプルトニウム富化度は18%以下に制限されており、本研究でもこの値を設計の目安とした。また、JMOXで取扱が許容されるMOX粉末は、プルトニウム含有率で60%以下、プルトニウム中の<sup>240</sup>Pu含有率は17%以上、MOX粉末中に含まれるウランの<sup>235</sup>U含有率は1.6%以下等が設定されている。

##### (2) 現行プルサーマル用燃料集合体製造方法との整合性

JMOX で取扱可能な  $\text{UO}_2$  粉末中の  $^{235}\text{U}$  濃縮度は天然ウラン中の含有率以下と設定されている。従って、JMOX 内で製造され、軸方向ブランケットとして MOX 燃料ペレットとともに燃料棒に充填される  $\text{UO}_2$  燃料ペレットの  $^{235}\text{U}$  濃縮度は 0.7wt% 以下ということになり、濃縮  $\text{UO}_2$  ペレットと MOX 燃料ペレットを同一の燃料棒に充填する設計は許容されていない。

MOX 燃料加工施設では、燃料集合体を構成するスペーサ等の部材については MOX 燃料加工施設外で製造調達し、MOX 燃料加工施設で MOX 燃料棒とともに集合体として組立てる製造プロセスが採用されており、燃料集合体の構造もこの製造プロセスと整合する必要がある。なお、余剰反応度制御のために可燃性毒物である  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  を添加した濃縮  $\text{UO}_2$  燃料棒を燃料棒の一部として使用する BWR プルサーマル燃料集合体のように、濃縮  $\text{UO}_2$  燃料棒を MOX 燃料棒とともに使用する場合には、濃縮  $\text{UO}_2$  燃料棒は MOX 燃料加工施設外で製造調達することになる。

### (3) $\text{UO}_2$ 燃料ペレットの最大 $^{235}\text{U}$ 濃縮度

上記の濃縮 $\text{UO}_2$ 燃料棒の $^{235}\text{U}$ 濃縮度は、現行 $\text{UO}_2$ 燃料加工施設での取扱可能制限値と同じく、5wt%未満と規定されている。

## 2.2.2 プルサーマルMOX燃料照射実績の活用

燃料を実際の炉に装荷し供用するには、その設計が照射実績データ等によりその妥当性、安全性が検証されている必要がある。プルサーマル利用のために開発、取得された燃料技術やデータ、あるいは今後のプルサーマル利用の推進により蓄積されるデータにもとづいて、燃料設計が可能であることが望ましい。

### (1) 取出平均燃焼度

MOX燃料の燃焼度は、プルサーマル利用により実証される燃焼度範囲である45~60GWd/tを目標として設定した。

### (2) 被覆管材料

FLWRでは、高速中性子束が現行の軽水炉より大きいため、被覆管の高速中性子照射量が増大することから、被覆管材料の設定が重要である。本研究では、現在 $\text{UO}_2$ 燃料の超高燃焼度化(70GWd/t)に対応して検討されている高燃焼度 $\text{UO}_2$ /MOX燃料対応のZr合金被覆管の利用を想定することとした。

## 2.3 MOX/ $\text{UO}_2$ 燃料棒併用増殖型燃料集合体(FLWR/MIX)

高プルトニウム富化度のMOX燃料棒を稠密格子に配列した体系は、一般にボイド反応度係数を正側にする特性を有するため、如何に負のボイド反応度特性を確保するかが炉心設計の中心課題である。図1.1に示したFLWRの第2段階の炉心設計では、炉心の高さを低くしかつ中間にブランケットを配置した二重扁平炉心構造により負のボイド反応度係数を実現している。

現行BWRにおける初期のプルサーマル利用においては、ボイド反応度係数や制御棒価値等の特性を最適な値に設定するために、集合体の周辺部にMOX燃料棒を取り囲むように $\text{UO}_2$ 燃料棒を配置した“アイランド型”と呼ばれる集合体設計が考案され実用化されている。

本研究では、濃縮 $\text{UO}_2$ 燃料棒は稠密格子配列においても負のボイド反応度特性を有することに着目して、稠密格子体系に上記の“アイランド型”の燃料棒配置の考え方を応用して、設計目標である負のボイド反応度係数を実現する設計概念の成立性を検討することとした。

図2.1に、FLWR/MIXと名付けたMOX/ $\text{UO}_2$ 燃料棒併用増殖型燃料集合体の断面図を示す。表2.1にFLWR/MIX燃料集合体の主要諸元をまとめている。合計217本のMOX燃料棒および濃縮 $\text{UO}_2$ 燃料棒を、 $\text{UO}_2$ 燃料棒がMOX燃料棒を取り囲むようにアイランド型かつ三角格子状に配置している。燃料棒の直径は13.5mm、燃料棒間隔は1.3mmであり、集合体内でのボイド率を考慮した実効的な水対燃料体積は0.3である。本集合体は、図1.1に示した第2段階の代表炉心の燃料集合体と比較して、燃料棒間隔は1.3mmと同一であるが燃料棒直径を13.7mmから13.5mmとやや細くして集合体の大きさが小さくなっている点が異なるが、制御棒配列や集合体ピッチ等の炉心構成は第2段階の炉心構成と同一である。

本燃料集合体は、前節で説明した $\text{UO}_2$ 燃料棒をMOX燃料棒とは別に製造調達してMOX燃料加工施設内でMOX燃料棒とともに集合体として組立てるという現行プルサーマル用燃料集合体の製造技術の適用が可能である。

FLWR/MIX燃料集合体の特性については次章で詳しく説明するが、上記のような構成により、濃縮 $\text{UO}_2$ 燃料棒が有する負のボイド反応度特性により集合体全体のボイド反応度特性を改善し、 $\text{UO}_2$ 燃料棒でのPuへの転換を促進させることで、軸方向ブランケットなしでも1.0近傍の核分裂性Pu残存比を実現する。

#### 2.4 FLWR/MIX燃料装荷炉心

本研究で対象とした電気出力1350MWの大型FLWRの主要諸元を表2.2に、また炉心の断面図を図2.2に示す。炉心は、六角形の燃料集合体900体から構成され、炉心外接円半径は3.8mである。燃料集合体の間には、燃料集合体3体に1体の割合でY字型の制御棒が全部で283体設置されている。制御棒は、制御材として $\text{B}_4\text{C}$ を用いたもので、BWRと同様に下方から挿入される。本炉心では、中性子スペクトルが硬くなるため、 $^{10}\text{B}$ による制御棒効果が減少することから、90%濃縮ボロンを用いている。制御棒の上部には、制御棒を引き抜いた時に水を排除できるようフォローを設けている。フォローは、破損時の水侵入抑制と中性子吸収減少のため黒鉛をSUSで被覆した構成となっている。

炉心冷却水流量はABWRの約40%として、炉心部平均のボイド率をABWRの40%から55%に高めて水による減速を抑制して高転換比を実現する。また、負のボイド反応度特性を確保するために、燃料有効長は1.2mと扁平な炉心を採用している。

MOX燃料は、劣化ウラン ( $^{235}\text{U}$ を0.2%含有) に軽水炉使用済燃料を再処理して回収されるプルトニウムを添加したもので、燃料ペレットの密度は、現行プルサーマル燃料と同じ理論密度の95%と設定した。設計検討で想定したプルトニウムの同位体組成を表2.3に示す。標準とした組成は、燃焼度45GWd/tのBWR燃料を再処理して得られるもので、核分裂性プルトニウム (Pu<sub>f</sub>) 含有率は57.5wt%である。また、 $\text{UO}_2$ 燃料の燃料ペレット密度は、現行の $\text{UO}_2$ 燃料と同じ97%理論密度を仮定した。

## 2.5 特性解析手法

取出燃焼度、所要プルトニウム量、転換比、ボイド反応度係数等の炉心性能は、炉心高さ、平均ボイド率、燃料装荷パターン等をもとに炉心設計で総合的に評価される量であり、BWR型原子炉については三次元核熱結合燃焼解析による評価が必須である。本研究では、日本原子力研究開発機構で開発されたモジュラー型炉心解析コードシステム MOSRA (Modular Code System for Reactor Analyses)<sup>9)10)</sup>を使用して炉心性能を評価した。本コードシステムは、核計算、熱水力計算、燃料温度計算、フィードバック断面積作成を担当するモジュール群と計算全体を制御するフレームで構成されており、各燃料集合体を独立に取扱った三次元核熱結合炉心燃焼解析が可能である。

中性子束分布および実効増倍率は、Triangular-Zの三次元体系での拡散計算により評価した。エネルギー群数は14群で実施した。表2.4にエネルギー群構造を示す。軸方向の計算体系図と水平方向の計算体系図を、図2.3と図2.4に示す。60度反射対称で、一つの燃料集合体は三角メッシュで6分割される。燃料領域の周囲には、飽和水領域、シュラウド領域を設け、その周囲は飽和水反射体領域とした。

熱水力計算では、一つの燃料集合体を一つの熱水力チャンネルとして計算を行う。各チャンネルの冷却材流量は、チャンネル毎の圧力損失が等しくなるように配分される。ボイド率相関式には、MOSRAに組込まれているJAEA-Drift-flux相関式を用いた。

燃料集合体の燃焼度依存、ボイド率依存のマクロ断面積は、衝突確率法に基づくMSRACコード<sup>10)</sup>を用いて作成した。中性子断面積ライブラリには、JENDL-3.3<sup>11)</sup>を用いた。エネルギー群数は107群である。燃料集合体格子燃焼計算では、図2.5に示す60度反射対称の二次元六角形状モデルを採用した。本計算モデルでは、ステンレス鋼で被覆されたグラフィトフォロワとギャップ領域の冷却水を、原子数を保存する均質化物質として扱い、これをチャンネルボックスの周囲に巻き付けている。また、マクロ断面積のボイド率依存性については、ボイド率分布を考慮してそれぞれ、0%、40%、80%の3点のボイド率での燃焼計算をおこない、MOSRAの入力定数を作成した。図2.5の燃料集合体幾何形状のモデル化の妥当性については、連続エネルギーモンテカルロ法計算コードMVP<sup>12)</sup>により確認した。表2.5に、制御棒フォロワの形状および非対称配置を正確に考慮した場合と均質化した場合の無限増倍率の比較の一例を示す。計算の対象は、第4章で述べる早期導入用FLWR/MIX燃料集合体である。

表 2.1 FLWR/MIX 燃料集合体の主要諸元

項目	単位	FLWR/MIX
燃料棒本数	-	217
燃料棒直径	mm	13.5
燃料棒ピッチ	mm	14.8
燃料棒間隔	mm	1.3
燃料集合体外面間距離	mm	224,7
水対燃料体積比 (集合体)	-	0.58
被覆管材料		Zircalloy-2

表 2.2 大型 FLWR 炉心の主要諸元

		FLWR	ABWR
電気出力	MWe	1,356	1,356
熱出力	MWt	3,926	3,926
原子炉圧力	MPa	7.2	7.2
炉心冷却材流量	10 <sup>3</sup> t/h	23.4	52.0
炉心平均ボイド率	%	54	43
炉心等価直径	m	7.37	5.16
燃料集合体数		900	872
制御棒数	t	283	205
炉心有効長	m	1.2	3.71

表 2.3 設計で想定した MOX 燃料のプルトニウム組成

項目		標準ケース	Puf 高含有ケース
同位体 重量比率 (wt%)	Pu-238	2.7	1.9
	Pu-239	47.9	57.5
	Pu-240	30.3	23.3
	Pu-241	9.6	10.0
	Pu-242	8.5	5.4
	Am-241	1.0	1.9
Puf (wt%)		57.5	67.5

表 2.4 3次元炉心拡散計算でのエネルギー群構造

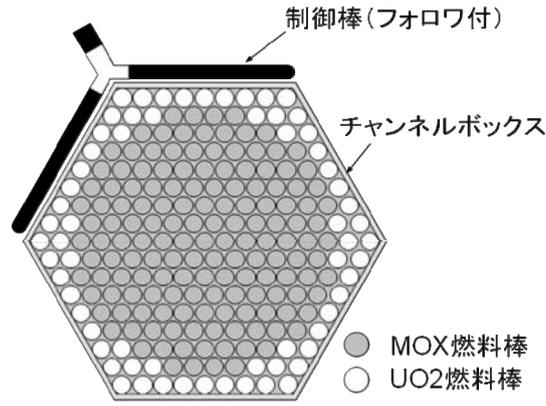
群	上限エネルギー(eV)	下限エネルギー(eV)
1	1.0000E+07	2.8650E+06
2	2.8650E+06	1.054E+06
3	1.0540E+06	3.877E+05
4	3.8774E+05	1.1109E+05
5	1.1109E+05	3.1828E+04
6	3.1828E+04	9.1188E+03
7	9.1188E+03	1.2341E+03
8	1.2341E+03	1.3007E+02
9	1.3007E+02	1.7604E+01
10	1.7604E+01	2.3824E+00
11	2.3824E+00	1.4450E+00
12	1.4450E+00	5.3158E-01
13	5.3158E-01	1.3700E-01
14	1.3700E-01	1.0000E-05

表 2.5 燃料集合体無限増倍率計算結果の比較

集合体 平均ボイド率	制御棒フォロワの 詳細構造及び 非対称配置を考慮	制御棒フォロワを 1/6 対称・均質化近似
0%	1.16567±0.00013	1.16545±0.00013
40%	1.15168±0.00013	1.15146±0.00012
80%	1.14609±0.00013	1.14556±0.00011

計算対象：早期導入用燃料集合体（図 4.1 参照）、燃焼度 0.0GWd/t

計算コード：連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP



燃料棒数 217本  
 燃料棒ピッチ 14.8mm  
 燃料棒外径 13.5mm  
 燃料棒間隔 1.3mm  
 集合体外面間距離 224.7mm

図 2.1 MOX/UO<sub>2</sub> 燃料棒併用増殖型燃料集合体(FLWR/MIX)の断面図

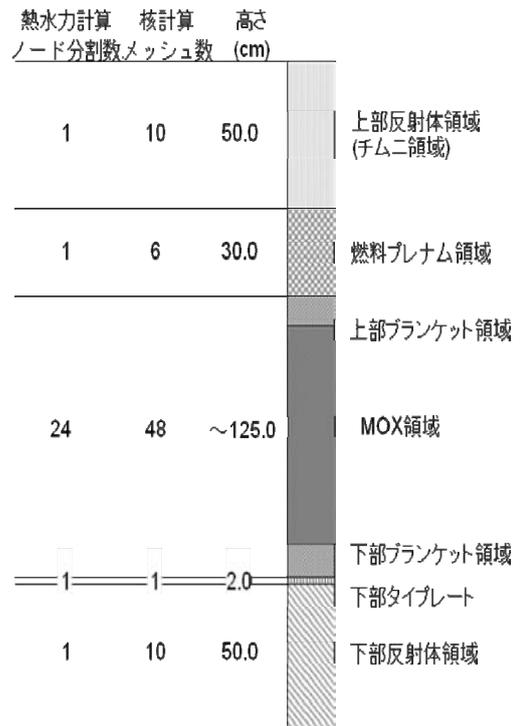
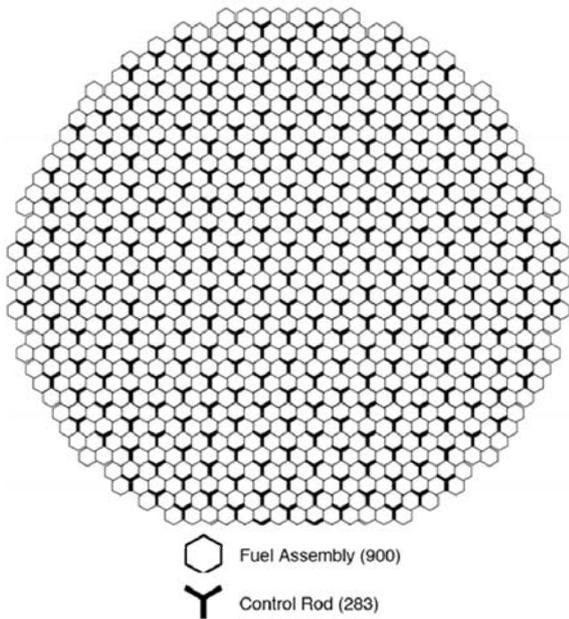


図 2.2 大型 FLWR 炉心の断面図

図 2.3 炉心軸方向の計算体系図

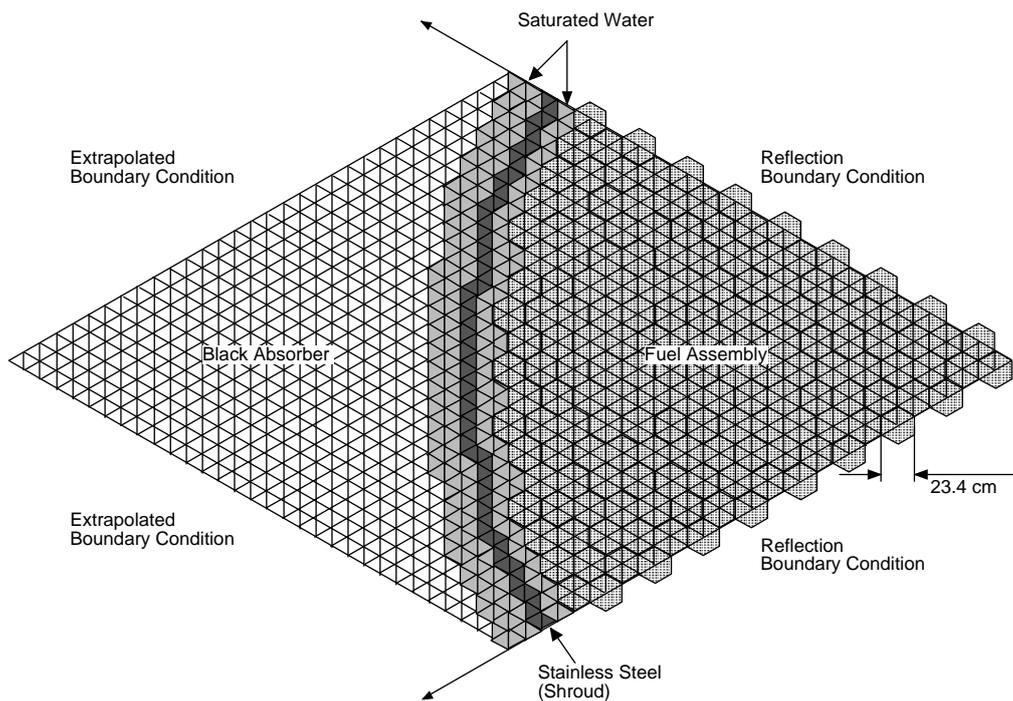


図2.4 炉心水平方向の計算体系図

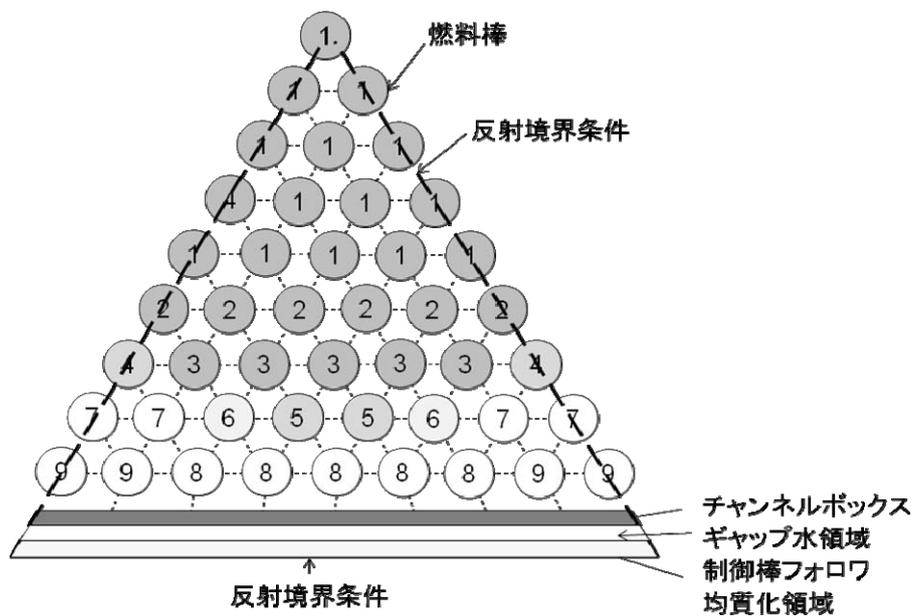


図2.5 燃料集合体格子燃焼計算の幾何形状モデル

### 3. FLWR/MIX燃料装荷炉心の特性評価

#### 3.1 稠密格子体系におけるボイド反応度特性

一般に、稠密格子体系でのMOX燃料棒は、Pu富化度や稠密度を高めていくと、ボイド反応度係数を正の方向にシフトさせる特性を有している。一方、 $\text{UO}_2$ 燃料棒は稠密格子体系においても負のボイド反応度特性を保持しており、稠密格子体系において、MOX燃料棒とともに $\text{UO}_2$ 燃料棒を配列することで、体系全体のボイド反応度特性を制御することができる。

図2.1に示した稠密格子燃料集合体において、燃料棒の種類や組合せを変えた場合のボイド反応度特性を図3.1に示す。全ての燃料棒を核分裂性Pu富化度10wt%のMOX燃料棒とした設計では、集合体のボイド率の上昇とともに無限増倍率が增大するのに対して、全ての燃料棒を $^{235}\text{U}$ 濃縮度4.95wt%の $\text{UO}_2$ 燃料棒とした場合の無限増倍率はボイド率の上昇とともに大きく減少する。核分裂性Pu富化度10wt%のMOX燃料棒151本と $^{235}\text{U}$ 濃縮度4.95wt%の $\text{UO}_2$ 燃料棒66本を組み合わせたFLWR/MIX燃料集合体では、ボイド率とともに無限増倍率がわずかに減少する特性を実現している。この特性が炉心全体での負のボイド反応度特性の実現に大きく寄与する。一方、FLWR/MIX燃料集合体とほぼ同じ核分裂性物質を含有する核分裂性Pu富化度8.6wt%の全MOX燃料集合体では正のボイド反応度特性となっている。

図3.1に示す燃料集合体無限増倍率の比較から、核分裂性Pu富化度10wt%のMOX燃料棒を比較的濃縮度の低い $\text{UO}_2$ 燃料棒に置き換えても、大きな反応度損失にはならないことがわかる。これは、隣接する燃料集合体との間の約5mm程度のギャップ水の存在により $\text{UO}_2$ 燃料棒の反応度が高められることによる。

FLWR/MIX燃料集合体設計の大きな特長のひとつは、 $\text{UO}_2$ 燃料棒が効率的なブランケット燃料としての役割を果たし、集合体全体としての転換比を高めることができる点である。燃料集合体の周辺部に配置した $\text{UO}_2$ 燃料棒の局所出力ピーキングは0.7以上であり、 $\text{UO}_2$ 燃料棒での $^{238}\text{U}$ の捕獲反応割合を高めることで高転換特性の実現に寄与する。

#### 3.2 主要設計パラメータの炉心特性に及ぼす影響

FLWR/MIX燃料集合体のボイド反応度特性に支配的な影響を及ぼす設計パラメータは、集合体周辺に配置する $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数と $^{235}\text{U}$ 濃縮度である。また、MOX燃料棒のPu富化度とPuの同位体組成もボイド反応度特性に影響を及ぼす。これらの設計パラメータがFLWR/MIX燃料集合体の仕様およびFLWR/MIX燃料集合体を装荷した炉心の性能に及ぼす影響を把握するため、上記の設計パラメータを変更したFLWR/MIX燃料集合体について、平衡サイクル炉心特性を評価した。平衡サイクル炉心設計で設定した燃料装荷パターンを図3.2に示す。燃料交換バッチ数は5であり、運転サイクル期間として約18か月を想定した。

炉心性能を評価する指標として、次の6項目に着目した。

- (1) バッチ平均取出燃焼度 (GWd/t)
- (2) 核分裂性物質あたりのエネルギー発生量 (GWd/t)

燃料集合体に装荷された核分裂性物質 ( $^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ ) の単位重量あたりの燃料集合体を取り出されるまでに発生した積算エネルギー量

(3) 核分裂性プルトニウム残存比

燃料装荷時と取出時の集合体全体での核分裂性プルトニウム ( $^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu}$ ) 量の比

(4)  $^{235}\text{U}$ 残存比

燃料装荷と取出時の集合体全体での $^{235}\text{U}$ 量の比

(5) 核分裂性物質転換比

燃料装荷時と取出時の集合体全体での核分裂性物質量の比

(6) ボイド反応度係数 ( $\Delta k/k/\%$ ボイド率)

定格炉心流量時と90%定格流量時の実効増倍率の差から評価

### 3.2.1 周辺配置 $\text{UO}_2$ 燃料棒本数

図3.3に示す $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数を48本、56本、66本、90本とした4種類のFLWR/MIX燃料集合体と全ての燃料棒をMOX燃料棒とした設計を対象に、周辺配置 $\text{UO}_2$ 燃料棒本数の炉心性能への影響を解析した。各燃料集合体の仕様および燃料集合体を装荷した平衡サイクル炉心特性を表3.1に示す。FLWR/MIX燃料集合体の $\text{UO}_2$ 燃料棒の $^{235}\text{U}$ 濃縮度は4.95wt%としており、燃料集合体断面平均の核分裂性物質含有率はほぼ等しく設定されている。また、全MOX燃料集合体は、内部のMOX燃料のPu富化度分布を、周辺配置 $\text{UO}_2$ 燃料棒48本のCase 1設計と同一とし、外周の燃料棒48本を核分裂性Pu富化度4.75wt%のMOX燃料棒で置換えた設計となっている。MOX燃料のPu組成は、表2.3の標準ケースの組成を使用した。

上記5種類の設計について燃焼度0.0Gwd/tでの無限増倍率のボイド依存性を図3.4に示す。全MOX燃料集合体では正のボイド反応度特性を示しているに対して、FLWR/MIX燃料集合体はいずれも負のボイド反応度特性を実現しており、また、燃料集合体平均の核分裂性物質含有率をほぼ等しくした条件のもとでは、周辺配列 $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数を多くした設計が大きな負のボイド反応度特性を有していることがわかる。

ボイド反応度係数は、燃料の燃焼が進むにつれて正側に変化していく。平衡サイクル炉心では、サイクル末期のボイド反応度係数が最も厳しくなる。表3.1にまとめた平衡サイクル炉心の設計では、炉心の高さ、すなわち燃料有効長をサイクル末期でのボイド反応度係数が負となるように決定した。周辺配列 $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数が多い設計では、集合体自体のボイド反応度特性が改善されているため、炉心のボイド反応度係数を負にするための燃料有効長の短尺化の度合いが緩和され、燃料有効長を相対的に大きく設定することが可能である。このため、燃料有効長の短尺化による反応度損失を抑えることができ、取出燃焼度は増大する。正のボイド反応度特性を有する全MOX燃料集合体を装荷する炉心では、炉心全体として負のボイド反応度係数を満足するために燃料有効長をFLWR/MIX燃料集合体の80%まで短縮する必要があり、取出燃焼度は30Gwd/t程度と大幅に低下する。

表3.1に示したFLWR/MIX燃料集合体の核分裂性Pu残存比は、いずれも0.97以上となっており、集合体平均の核分裂性物質含有率をほぼ等しくした場合、核分裂性Pu残存比は周辺 $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数の増加とともに増加し、90本のCase 4では1.0を超える核分裂性Pu残存比を実現している。一方、 $\text{UO}_2$ 燃料棒の $^{235}\text{U}$ 濃縮度を4.95wt%とした場合、装荷時の集合体平均での $^{235}\text{U}$ 濃縮度は1.2~2.2wt%であり、約60%の $^{235}\text{U}$ が燃焼によって消費され、取出時には約40%の $^{235}\text{U}$ が残存して

おり、取出時の集合体平均 $^{235}\text{U}$ 濃縮度は0.9wt%以下となっている。 $^{238}\text{U}$ のPuへの転換と $^{235}\text{U}$ の消費の効果を含めた核分裂性物質転換比は、表3.1に示した全てのFLWR/MIX設計で約0.9である。表3.2には、Pu含有率67.5wt%とした場合の比較を参考として示した。個々の数値は異なるものの、周辺配列 $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数依存性は表3.1の場合と同様である。

以上の検討から、周辺配列 $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数を増やしたFLWR/MIX集合体設計案が、取出燃焼度や核分裂性Pu残存比の観点からは有利であるといえる。

### 3.2.2 $\text{UO}_2$ 燃料棒濃縮度

周辺配列 $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数を48本としたFLWR/MIX燃料集合体において、 $\text{UO}_2$ 燃料棒の $^{235}\text{U}$ 濃縮度を0.7wt%、2.5wt%、4.95wt%とした設計での燃焼度0.0GWd/tにおける無限増倍率のボイド依存性を図3.5に示す。各燃料集合体の仕様および燃料集合体を装荷した平衡サイクル炉心特性を表3.3に示す。周辺配置 $\text{UO}_2$ 燃料棒48本以外の内部のMOX燃料のPu富化度分布は同一として比較している。MOX燃料のPu組成は、表2.3の標準ケースの組成を使用した。

図3.5において、無限増倍率の値は、集合体平均の核分裂性物質含有率の相違によって異なるものの、3ケースとも同様のボイド依存性を示している。このことは、集合体周辺のMOX燃料棒を $\text{UO}_2$ 燃料棒で置換することは、 $\text{UO}_2$ 燃料棒濃縮度の如何に抛らずに、ボイド反応度特性の制御に一定の効果を有していることを示唆している。表3.3にまとめた平衡サイクル炉心の設計では、 $\text{UO}_2$ 燃料棒本数に関する比較の場合と同じく、燃料有効長をサイクル末期でのボイド反応度係数が負となるように決定している。

3ケースの比較において、取出燃焼度の差は $\text{UO}_2$ 燃料棒の濃縮度の違いによる。性能の良否の指標となる核分裂性物質あたりのエネルギー発生量は、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度4.95wt%の設計案が最も大きくなっており、 $^{235}\text{U}$ 資源の有効利用という点から、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度を高め、燃焼度を増大させた設計が有利となる。

なお、天然ウラン燃料棒を周辺配置した設計は、濃縮ウランを使わないという点で着目すべき設計概念ではあるが、 $\text{UO}_2$ 燃料棒の燃焼初期の局所出力ピーキングが0.3と小さく、集合体内部でのボイド率分布に偏りが生じ、限界出力特性が低下するという問題を有していることに留意する必要がある。

### 3.2.3 Pu同位体組成

MOX燃料棒のPu同位体組成の影響については、表3.1および表3.2の比較からもわかるが、 $\text{UO}_2$ 燃料棒48本および66本の場合についてより直接的な比較を表3.4および表3.5に示す。

平均核分裂性Puの富化度と燃料有効長を同一にした条件下では、核分裂性Pu含有率が57.5%のPuに変えて核分裂性Pu含有率67.5%のPuを使用すると取出燃焼度は低下するが、ボイド反応度係数はより負側に変化する。このボイド反応度特性が緩和されることを利用して、燃料有効長を大きくすることで炉心反応度を高め、取出燃焼度の低下分を補償することができる。

ボイド反応度係数の制御という観点からは、核分裂性Pu含有率の高いPuを使用する場合には、周辺配置 $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数を減らしてもボイド反応度係数を負に維持することが可能であることを意味する。

以上のように、FLWR/MIX燃料集合体では、UO<sub>2</sub>燃料棒の本数を変更してボイド反応度係数を調整することが可能であり、使用するMOX燃料棒のPu富化度やPu組成に対応した柔軟な設計を実現できる。

表 3.1 周辺配置 UO<sub>2</sub> 燃料棒本数の炉心性能への影響(1)－Pu 組成：Puf 含有率=57.5%

項 目	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
MOX 燃料棒本数/UO <sub>2</sub> 燃料棒本数	169/ <u>48</u>	163/ <u>54</u>	151/ <u>66</u>	127/ <u>90</u>	217/ <u>0</u>
燃料有効長(m)*	1.05	1.10	1.20	1.45	0.80
MOX 燃料棒平均 Puf 富化度 (wt%)	9.83	10.01	10.41	11.36	9.83**
UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度 (wt%)	4.95	4.95	4.95	4.95	4.75***
集合体平均核分裂性物質含有率 (wt%)	8.88	8.87	8.85	8.78	8.89
集合体平均 Puf 含有率 (wt%)	7.65	7.50	7.22	6.62	8.72
集合体平均 <sup>235</sup> U 含有率 (wt%)	1.23	1.37	1.63	2.16	0.17
取出平均燃焼度 (GW d /t)	43	45	48	52	27
核分裂性物質あたりのエネルギー発生量 (GWd/t)	484	507	542	592	304
核分裂性 Pu 残存比	0.97	0.98	0.99	1.03	0.95
<sup>235</sup> U 残存比	0.45	0.44	0.42	0.40	0.71
核分裂性物質転換比	0.90	0.89	0.89	0.87	0.94
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%ボイド)	-0.4	-0.3	-0.3	-0.7	-0.2

\* 平衡サイクル末期のボイド反応度係数が負を満足するように燃料有効長を設定。

\*\* 中央領域 169 本の MOX 燃料棒の Pu 富化度分布は Case 1 と同一。

\*\*\* 最外周の MOX 燃料棒の Puf 富化度。

表 3.2 周辺配置 UO<sub>2</sub> 燃料棒本数の炉心性能への影響(2) -Pu 組成 : Puf 含有率=67.5%

項 目	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
MOX 燃料棒本数/UO <sub>2</sub> 燃料棒本数	169/ <u>48</u>	163/ <u>54</u>	151/ <u>66</u>	217/ <u>0</u>
燃料有効長 (m)*	1.25	1.30	1.40	1.00
MOX 燃料棒平均 Puf 富化度 (wt%) UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度 (wt%)	9.83 4.95	10.01 4.95	10.41 4.95	9.83** 4.75***
集合体平均核分裂性物質含有率 (wt%) 集合体平均 Puf 含有率 (wt%) 集合体平均 <sup>235</sup> U 含有率 (wt%)	8.88 7.65 1.23	8.87 7.50 1.37	8.85 7.22 1.63	8.89 8.72 0.17
取出平均燃焼度 (GW d /t)	45	47	48	36
核分裂性物質あたりのエネルギー発生量 (GWd/t)	507	528	542	405
核分裂性 Pu 残存比	0.96	0.97	0.98	0.92
<sup>235</sup> U 残存比	0.43	0.41	0.41	0.62
核分裂性物質転換比	0.89	0.88	0.88	0.92
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%ボイド)	-1.3	-1.2	-1.4	-0.5

\* 平衡サイクル末期のボイド反応度係数が負を満足するように燃料有効長を設定。

\*\* 中央領域 169 本の MOX 燃料棒の Pu 富化度分布は Case 1 と同一。

\*\*\* 最外周の MOX 燃料棒の Puf 富化度。

表 3.3 UO<sub>2</sub> 燃料棒濃縮度の炉心性能への影響

項 目	Case 1	Case 2	Case 3
MOX 燃料棒平均 Puf 富化度 (wt%) UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度 (wt%)	10.05 <u>0.7</u>	10.05 <u>2.5</u>	10.05 <u>4.95</u>
MOX 燃料棒本数/UO <sub>2</sub> 燃料棒本数	169/48	←	←
燃料有効長 (m)*	1.20	1.10	1.00
集合体平均核分裂性物質含有率 (wt%) 集合体平均 Puf 含有率 (wt%) 集合体平均 <sup>235</sup> U 含有率 (wt%)	8.09 7.80 0.29	8.49 7.80 0.69	9.03 7.80 1.23
取出平均燃焼度 (GW d /t)	33	39	45
核分裂性物質あたりのエネルギー発生量 (GWd/t)	408	459	498
核分裂性 Pu 残存比	0.97	0.96	0.96
<sup>235</sup> U 残存比	0.55	0.47	0.44
核分裂性物質転換比	0.95	0.92	0.89
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%ボイド)	-0.2	-0.3	-0.2

\* 平衡サイクル末期のボイド反応度係数が負を満足するように燃料有効長を設定。

表 3.4 MOX 燃料棒組成の炉心性能への影響(1)－UO<sub>2</sub>燃料棒 48 本

項 目	Case 1	Case 2	Case 3
MOX 燃料棒の Pu 組成 (核分裂性 Pu 割合) (wt%)	57.5	67.5	←
MOX 燃料棒本数/UO <sub>2</sub> 燃料棒本数	169/48	←	←
燃料有効長 (m)	1.05	←	1.25
MOX 燃料棒平均 Puf 富化度 (wt%) UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度 (wt%)	9.83 4.95	←	←
集合体平均核分裂性物質含有率 (wt%) 集合体平均 Puf 含有率 (wt%) 集合体平均 <sup>235</sup> U 含有率 (wt%)	8.88 7.65 1.23	←	←
取出平均燃焼度 (GW d /t)	43	38	45
核分裂性物質あたりのエネルギー発生量 (GWd/t)	484	428	507
核分裂性 Pu 残存比	0.97	0.97	0.96
<sup>235</sup> U 残存比	0.45	0.48	0.43
核分裂性物質転換比	0.90	0.90	0.89
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%ボイド)	-0.4	-2.6	-1.3

表 3.5 MOX 燃料棒組成の炉心性能への影響(2)－UO<sub>2</sub>燃料棒 66 本

項 目	Case 1	Case 2	Case 3
MOX 燃料棒の Pu 組成 (核分裂性 Pu 割合) (wt%)	57.5	67.5	←
MOX 燃料棒本数/UO <sub>2</sub> 燃料棒本数	151/66	←	←
燃料有効長 (m)	1.20	←	1.40
MOX 燃料棒平均 Puf 富化度 (wt%) UO <sub>2</sub> 燃料棒濃縮度 (wt%)	10.41 4.95	←	←
集合体平均核分裂性物質含有率 (wt%) 集合体平均 Puf 含有率 (wt%) 集合体平均 <sup>235</sup> U 含有率 (wt%)	8.85 7.22 1.63	←	←
取出平均燃焼度 (GW d /t)	48	43	48
核分裂性物質あたりのエネルギー発生量 (GWd/t)	542	486	542
核分裂性 Pu 残存比	0.99	0.99	0.98
<sup>235</sup> U 残存比	0.42	0.45	0.41
核分裂性物質転換比	0.89	0.89	0.88
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%ボイド)	-0.3	-2.5	-1.4

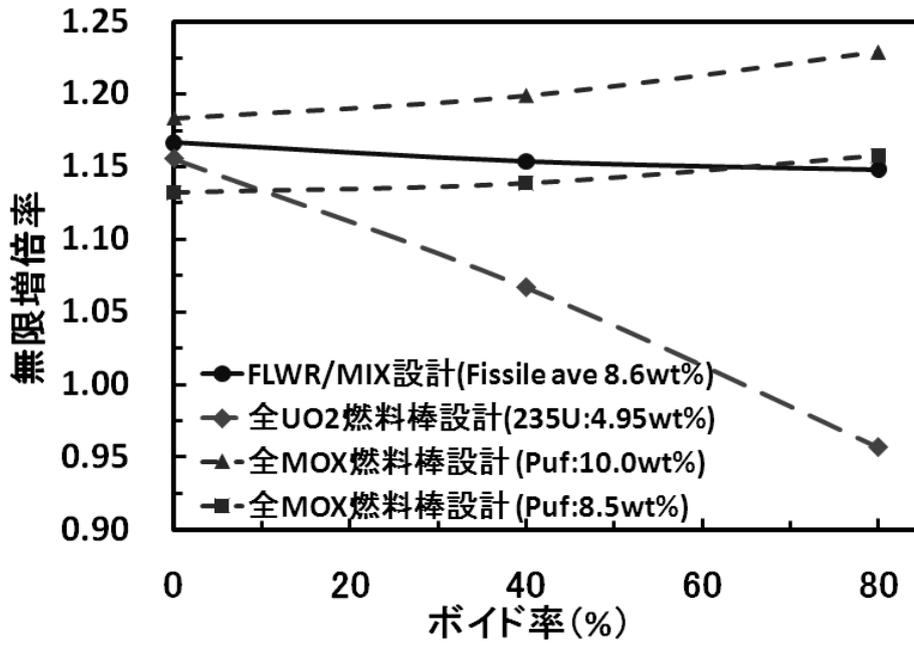


図3.1 稠密格子燃料集合体のボイド反応度特性

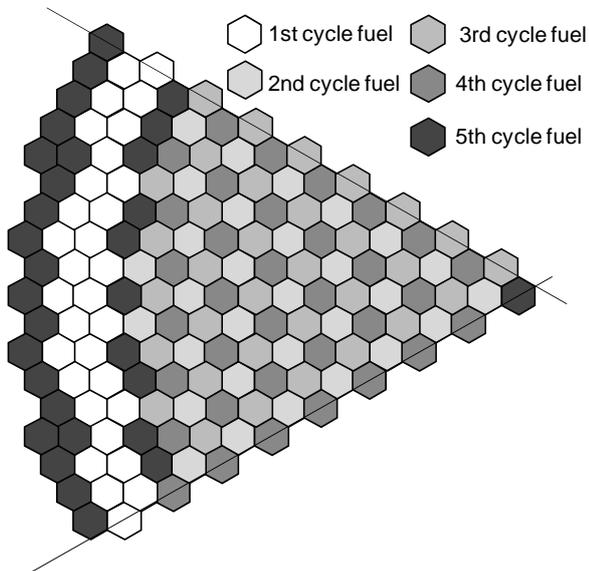


図3.2 平衡サイクル炉心の燃料装荷パターン

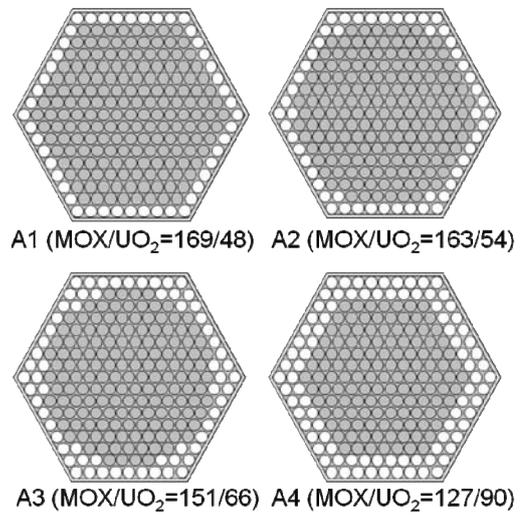


図3.3 FLWR/MIX燃料集合体の燃料棒配置例

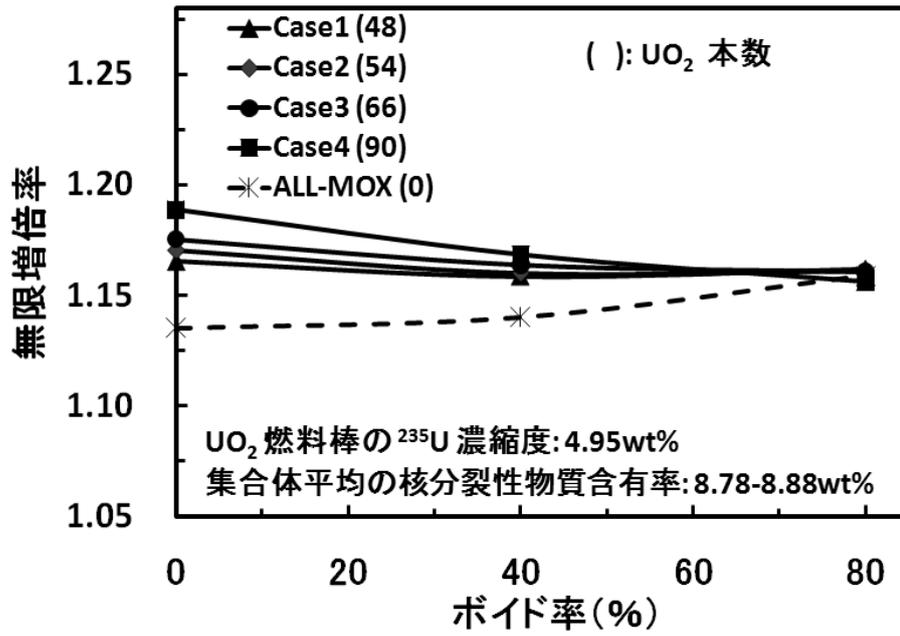


図3.4 FLWR/MIX燃料集合体のボイド反応度特性 (1) UO<sub>2</sub>燃料棒本数の影響

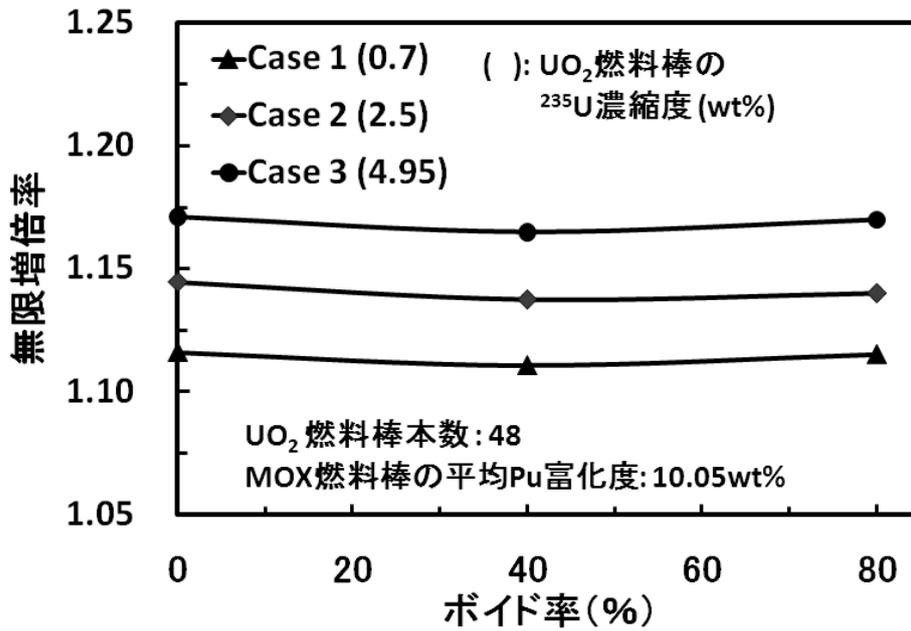


図3.5 FLWR/MIX燃料集合体のボイド反応度特性 (2) UO<sub>2</sub>燃料棒濃縮度の影響

#### 4. FLWR/MIX設計概念にもとづく資源の柔軟な利用

前章でのFLWR/MIX燃料集合体および炉心についての予備的検討にもとづいて、FLWRにおけるプルトニウムの柔軟な利用を実現するための概念設計をまとめた。

##### 4.1 軽水炉燃料サイクルインフラを利用した増殖型運転

軽水炉サイクルから高速炉サイクルへのスムーズかつ早期の移行を実現する観点から、六ヶ所再処理施設やMOX燃料加工施設等の軽水炉サイクルインフラを活用して、FLWRの第1ステップにおいて転換比を1.0近傍まで高めた増殖型運転を早期に実現することが望ましい。

日本原燃(株)のMOX燃料製造加工施設(JMOX)での条件を参考にして、MOX燃料ペレットの全Pu富化度を、JMOXで製造可能な18%以下とした条件のもとで、早期導入用増殖型燃料集合体の概念設計を行った。図4.1に早期導入用燃料集合体の断面図を示す。MOX燃料棒の本数は151本、 $UO_2$ 燃料棒の本数は66本である。Pu同位体組成として表2.3の標準ケースの組成を使用し、MOX燃料棒ペレットの核分裂性Pu富化度の最大値を10.3wt%とした。対応する全Pu富化度は17.9wt%である。 $UO_2$ 燃料棒の $^{235}U$ 濃縮度は現行 $UO_2$ 燃料加工施設での取扱可能な4.95wt%である。

表4.1の早期導入用炉心の欄に主要仕様と特性をまとめた。本設計は、軸方向ブランケットを設置せずに核分裂性Pu残存比1.00を確保し、バッチ平均取出燃焼度45GWd/tを達成することができる。ボイド反応度係数もサイクルを通じて負の値を確保している。表4.2に取出燃料のバッチ平均のTRU組成を装荷時と比較して示す。高次Puの増加等のPu組成の劣化はなく、FLWRの第2ステップでの多重リサイクル利用に供することが可能である。図4.2に平衡サイクル炉心の炉心径方向出力分布を示す。

燃料健全性の観点から、最大取出燃焼度49GWd/tの燃料集合体について被覆管の高速中性子照射量を評価した。燃焼度が60GWd/tとなる燃料棒位置での1 MeV以上の高速中性子照射量は、 $2.1 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ である。我が国では、 $UO_2$ 燃料の超高燃焼度化(70GWd/t)に対応した被覆管材料の研究開発が進められており<sup>13), 14)</sup>、その中でジルカロイ-2および改良Zr合金についての照射実績として $1.5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2 (E > 1.0 \text{ MeV})$ のデータが得られており、さらにデータの蓄積がなされている。従って、開発が進められている高燃焼度 $UO_2$ /MOX燃料対応のZr合金被覆管の採用により、燃料の健全性を維持することは可能であると考えられる。

##### 4.2 高燃焼度・高転換型炉心

FLWR/MIX設計概念のポテンシャルを把握する観点から、MOXペレットの全Pu富化度18%以下という条件を撤廃し、核分裂性Pu富化度を高めて燃焼度を増大した高燃焼度炉心と、軸方向ブランケットを設置して核分裂性Pu残存比1.0以上をめざした高転換型炉心の概念設計を行った。

図4.3に高燃焼度炉心用のFLWR/MIX燃料集合体の断面図を、表4.1の高燃焼度炉心の欄に主要仕様と特性をまとめた。MOX燃料の核分裂性Pu富化度を高めると、ボイド反応度係数は正側に变化する。この影響を緩和するため、高燃焼度炉心用燃料集合体では、周辺配置 $UO_2$ 燃料棒本

数を早期導入用燃料集合体の66本から90本に増加している。MOX燃料棒の最大核分裂性Pu富化度は、13%wt%（全Pu富化度で22.6wt%）であり、 $\text{UO}_2$ 燃料の $^{235}\text{U}$ 濃縮度は4.95wt%と早期導入用の設計と同一である。このような仕様により、核分裂性Pu残存比1.0を確保し、取出燃焼度57GWd/tを達成可能である。高燃焼度炉心は、核分裂性物質あたりの発生エネルギーの観点でも優れている。

高転換型炉心では、燃料有効長を高燃焼度炉心と同じ120cmとし、MOX燃料部の長さを20cm短縮して、劣化ウランからなるブランケット領域を炉心の上端および下端に各々10cmずつ設置した。集合体断面でのPu富化度分布は高燃焼度炉心と同一である。炉心解析の結果、軸方向ブランケットつきのFLWR/MIX燃料集合体では、核分裂性Pu残存比を1.05程度まで高めることが可能であるとの見通しが得られた。高転換型FLWR/MIX集合体設計は、転換比の高い炉心燃料が求められる軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期用の設計として有効である。

#### 4.3 回収ウランの利用

軽水炉の使用済燃料を再処理すると、天然ウラン相当の $^{235}\text{U}$ を含有するウランが回収される。軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行期での利用を想定して、軽水炉使用済燃料の再処理により回収されるウランを再濃縮して、FLWR/MIX燃料集合体の周辺配置 $\text{UO}_2$ 燃料棒として利用する概念の成立性を検討した。

図4.4に、回収ウラン利用FLWR/MIX燃料集合体の断面図を示す。MOX燃料棒の本数やMOX燃料棒の富化度分布は、高燃焼度炉心用の設計と同一である。軽水炉使用済燃料から回収されるウランには、中性子吸収体である $^{236}\text{U}$ が含まれている。 $^{236}\text{U}$ の含有量は、使用済燃料の燃焼度や装荷時の $^{235}\text{U}$ 濃縮度に依存する。今回の設計では、燃焼度45GWd/tの軽水炉使用済燃料から回収されるウランを、 $^{235}\text{U}$ が4.95wt%になるまで再濃縮して使用することを想定した。回収ウラン中の $^{235}\text{U}$ と $^{236}\text{U}$ の含有率はそれぞれ0.7wt%と0.5wt%であり、 $^{235}\text{U}$ が4.95wt%まで濃縮した場合の $^{236}\text{U}$ の含有率は約2.5wt%となる。

表4.1に示すように、回収ウラン利用のブランケット無の炉心設計①では、核分裂性Pu残存比1.00を確保して、燃焼度49GWd/tの達成が可能である。同一のMOX燃料を使用した高燃焼度炉心用設計と比較して燃焼度が低下するのは、 $^{236}\text{U}$ による反応度損失によるものである。MOX燃料部の上下端に5cmのブランケットを設置した炉心設計②では、燃焼度45GWd/tを確保して、Pu多重リサイクルのために必要とされる核分裂性Pu残存比の目安である1.03を実現できる見通しである。

軽水炉使用済燃料から回収されるウランは、天然ウランと並ぶ大切な資源であり、また軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの移行に伴い、軽水炉使用済燃料の再処理量の増大に伴い大量に発生することから、回収ウラン利用FLWR/MIX燃料集合体は、回収ウラン資源の利用法の有望な候補であると考えられる。

以上、早期導入用、高燃焼度、高転換型、そして回収ウラン利用のFLWR/MIX燃料集合体・炉心概念は、軽水炉サイクルから高速炉サイクルへの進展に対応した回収ウランを含むウラン資源およびプルトニウム資源の効率的かつ柔軟な利用に資すると期待できる。

表 4.1 FLWR/MIX 燃料装荷炉心の主要諸元

項 目	早期導入用 炉心	高燃焼度 炉心	高転換型 炉心	回収ウラン 利用炉心①	回収ウラン 利用炉心②
MOX 燃料棒本数/UO <sub>2</sub> 燃料棒本数	151/66	127/90	127/90	127/90	127/90
Pu 組成 (核分裂性 Pu 割合) (wt%)	57.5	57.5	57.5	57.5	57.5
燃料有効長 (cm)	125	120	120	120	120
MOX 部 (cm)	-	120	100	120	110
軸方向ブランケット部 (cm)		-	10+10	-	5+5
MOX ペレット最高 Pu 富化度 (wt%)	17.9	22.6	22.6	22.6	22.6
MOX 燃料棒平均 Puf 富化度 (wt%)	10.14	12.17	12.17	12.17	12.17
UO <sub>2</sub> 燃料棒 <sup>235</sup> U 濃縮度 (wt%)	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95
UO <sub>2</sub> 燃料棒 <sup>236</sup> U 含有率 (wt%)	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5
重金属重量 (kg/集合体)	253.6	244.0	244.3	244.0	244.1
集合体平均核分裂性物質含有 (wt%)	8.66	9.25	7.74	9.25	8.49
集合体平均核分裂性 Pu 含有率 (wt)	7.03	7.09	5.91	7.09	6.50
集合体平均 <sup>235</sup> U 含有率 (wt%)	1.63	2.16	1.83	2.16	1.99
炉心流量 (kg/s)	6500	6500	6500	6500	6500
入口温度 (K)	551	551	551	551	551
平均ボイド率 (%)	54.1	54.2	53.6	54.2	53.9
取出平均燃焼度 (GW d / t)	45	57	45	49	45
核分裂性物質あたりのエネルギー発生量 (GWd/ t)	519	616	581	530	529
Puf 残存比	1.00	1.00	1.05	1.00	1.03
<sup>235</sup> U 残存比	0.44	0.38	0.41	0.44	0.45
核分裂性物質転換比	0.90	0.85	0.90	0.87	0.89
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%ボイド)	-0.3	-0.5	-1.8	-0.2	-0.7

表 4.2 早期導入用 FLWR/MIX 燃料集合体の燃焼に伴う TRU 組成の比較

項 目	装荷時	取出時 (燃焼度 45GWd/t)
同位体 重量比率 (wt%)	Np-237	0.4
	Pu-238	2.4
	Pu-239	48.1
	Pu-240	29.7
	Pu-241	7.6
	Pu-242	7.8
	Am-total	3.6
	Cm-total	0.5
	Total	100.0

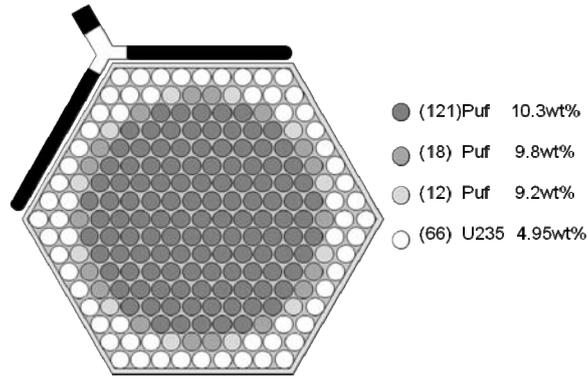


図 4.1 早期導入用 FLWR/MIX 燃料集合体の Pu 富化度分布

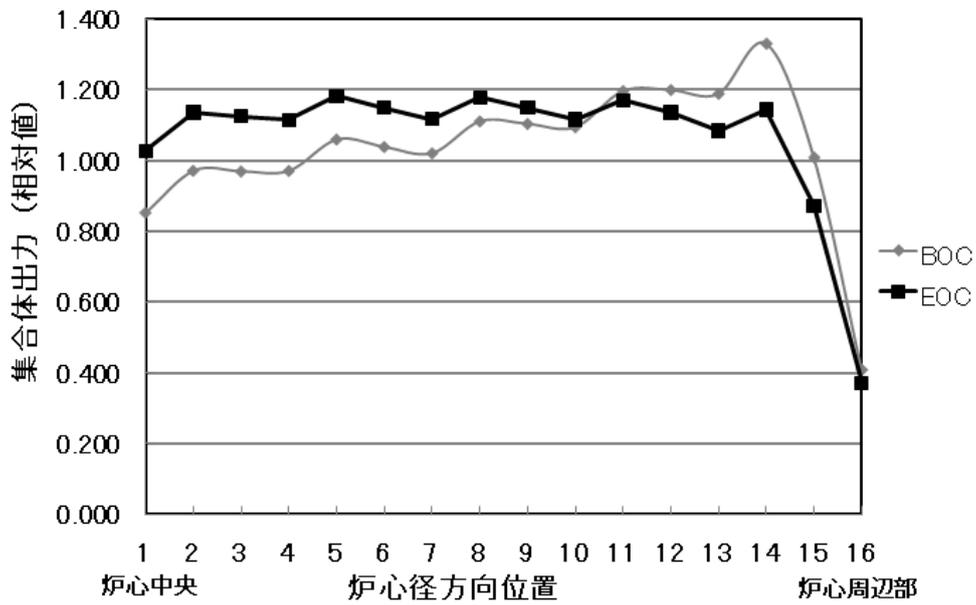


図 4.2 平衡サイクル炉心の出力分布

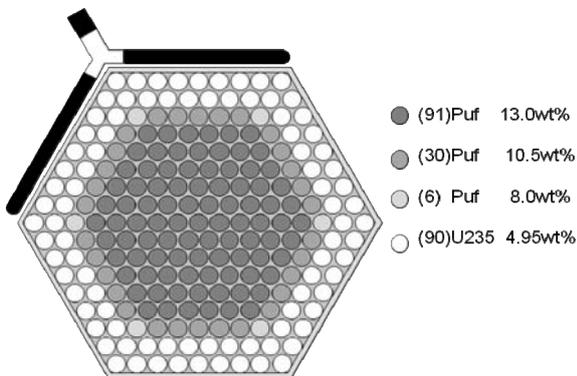


図4.3 高燃焼度及び高転換比  
FLWR/MIX燃料集合体のPu富化度分布

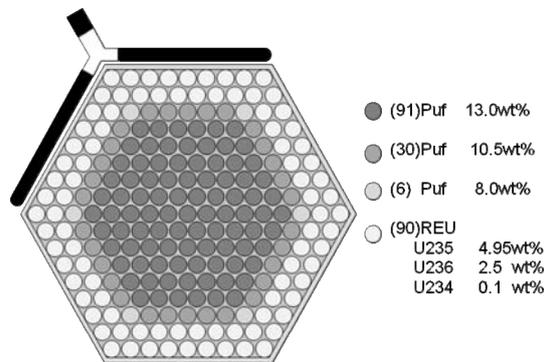


図4.4 回収ウラン(REU)利用  
FLWR/MIX燃料集合体のPu富化度分布

## 5. 部分MOX炉心の検討

利用可能なMOX燃料資源に対応した柔軟な運転を実現する観点から、FLWR/MIX燃料集合体と、 $\text{UO}_2$ 燃料棒のみを使用した稠密格子 $\text{UO}_2$ 燃料集合体を併用した部分MOX炉心の成立性を検討した。今回の検討では、稠密格子 $\text{UO}_2$ 燃料集合体の $^{235}\text{U}$ 濃縮度は、現行の $\text{UO}_2$ 燃料加工施設での製造限界と同じ5wt%未満とした。

### 5.1 部分MOX炉心の役割

プルトニウムの持続的な多重リサイクルの時代においても、原子炉の運転融通性の観点から $\text{UO}_2$ 燃料集合体およびそれを装荷した部分MOX炉心が一定の役割を果たすと考えられる。

再処理施設やMOX燃料加工施設の故障等、不測の事態によりMOX燃料の供給が滞った場合には、取替燃料集合体を $\text{UO}_2$ 燃料集合体とした部分MOX炉心として運転することにより、MOX燃料供給量に対する運転融通性を確保することができる。

また、初装荷炉心を全てMOX燃料集合体で構成した場合には、第1運転サイクル直後からMOX燃料集合体を順次取出し交換する必要があるため、初装荷炉心に装荷したMOX燃料集合体の平均取出燃焼度は相対的に低くなり、MOX燃料集合体の成形加工費等が高いことを考慮すると経済性の観点から好ましくない。その代替策として、初装荷炉心をMOX燃料集合体と $\text{UO}_2$ 燃料集合体とで構成することにより、 $\text{UO}_2$ 燃料集合体を先に取出し、初装荷炉心に装荷したMOX燃料集合体を炉心に長く滞在させることで、初装荷炉心MOX燃料集合体の取出燃焼度を増大させることができる。

そこで、本章では、部分MOX平衡サイクル炉心と部分MOX初装荷炉心の二つについて検討することとした。

### 5.2 稠密格子 $\text{UO}_2$ 燃料集合体

部分MOX炉心を構成する稠密格子 $\text{UO}_2$ 燃料集合体の設計例を図5.1に示す。本設計では、 $\text{UO}_2$ 燃料集合体の燃料棒径および燃料棒間隔はFLWR/MIX燃料集合体と同一とした。第3章で述べたように、 $\text{UO}_2$ 燃料を稠密格子に配列して水対燃料体積比を小さくすると、水対燃料体積比の大きい場合と比較して反応度は低下し、負のボイド反応度係数の絶対値が大きくなる。この問題を緩和するため、負のボイド反応度係数の絶対値低減と高反応度化の対策として、燃料棒49本を7本のウォータチャンネルで置換した設計を採用した。フォロー挿入時の水対燃料体積比は、FLWR/MIX燃料集合体の0.58に対して、 $\text{UO}_2$ 燃料集合体の場合は1.08と増加している。また、燃焼初期の余剰反応度を制御するため、ガドリニア入り燃料棒をウォータチャンネル周辺に配置している。

$^{235}\text{U}$ 濃縮度を4.95wt%とした $\text{UO}_2$ 燃料集合体を装荷した全 $\text{UO}_2$ 炉心の主要仕様と炉心特性の評価結果を表5.1に示す。平衡サイクル炉心の燃料装荷パターンを図5.2の(1)に示す。現行軽水炉と比較して、水対燃料体積比が小さくかつボイド率も10%程度高いこと、炉心が短尺のため中性子の漏れが大きいことから、 $\text{UO}_2$ 燃料集合体の達成燃焼度は22GWd/tと大幅に低下するが、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度5wt%未満の条件においても、燃料交換バッチ数2以上を確保して、運転サイクル期

間15カ月程度の運転は可能であるとの見通しが得られた。

### 5.3 部分MOX平衡サイクル炉心

FLWR/MIX燃料集合体の取替体数を減らし、MOX燃料の供給状況に柔軟に対応できる炉心として、MOX燃料集合体装荷率を33%、50%とした平衡サイクル炉心の特性を評価した。燃料集合体及び炉心の主要仕様および評価結果を表5.1に、それぞれ部分MOX炉心Ⅰ、部分MOX炉心Ⅱとして示す。FLWR/MIX燃料集合体は、第4章で示した早期導入用の設計とした。また、 $\text{UO}_2$ 燃料集合体の $^{235}\text{U}$ 濃縮度は、4.95wt%とし、ガドリニア入り燃料棒を24本配置し、 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 濃度は平衡サイクル末期で燃え残りがないように1.5wt%と設定した。

平衡サイクル炉心の燃料装荷パターンを図5.2の(2)と(3)に示す。水対燃料体積比の異なるFLWR/MIX燃料集合体と $\text{UO}_2$ 燃料集合体が隣接する場合、お互いの反応度を低くすることから、いずれの部分MOX炉心においても、 $\text{UO}_2$ 燃料集合体は炉心中央部に集中的に2バッチで分散配置し、FLWR/MIX燃料集合体は炉心周辺部に分散配置する装荷方式を採用した。FLWR/MIX燃料集合体の燃料交換については、燃料交換する集合体数を極力減らすという意味から、全MOX炉心と同じ5バッチ燃料交換としている。

表5.1に示したように、炉心の特性は燃料集合体の50%以上を占める $\text{UO}_2$ 燃料集合体の燃焼特性により支配されるが、MOX燃料集合体装荷率を50%以下にしても運転サイクル期間15カ月程度の運転は可能であるとの見通しが得られた。

### 5.4 部分MOX初装荷炉心

初装荷MOX燃料の装荷体数の削減と取出燃焼度の増大を目的として、図5.1に示した稠密格子 $\text{UO}_2$ 燃料集合体とFLWR/MIX燃料集合体から構成される初装荷炉心の概念設計をおこなった。

図5.3に初装荷炉心の燃料装荷パターンを、表5.2に初装荷炉心に装荷する燃料の仕様を示す。FLWR/MIX燃料集合体の仕様は平衡サイクル炉心での取替燃料集合体と同一である。FLWR/MIX燃料集合体の装荷体数は、5バッチ平衡サイクル炉心での取替体数と同じ180体とし、残りの720体を濃縮度4.95wt%と3.5wt%の2種類の $\text{UO}_2$ 燃料集合体としている。 $\text{UO}_2$ 燃料集合体には、余剰反応度制御を目的として、それぞれ24本および6本のガドリニア入り燃料棒を配置している。各燃料集合体の配置は、第2サイクル以後の燃料取替を平衡サイクルと同様な考えで行えるように、平衡サイクルの燃料装荷パターンを模擬して決定した。

第1サイクルから第5サイクルまでの移行サイクル炉心の特性を、運転サイクル長さ18カ月の条件で解析した。表5.3に移行サイクルにおける燃料集合体数の変化をまとめた。移行サイクルでの燃料交換では、FLWR/MIX燃料集合体の取替体数は平衡サイクルと同じ180体と固定し、サイクル毎の反応度調整は、 $\text{UO}_2$ 燃料集合体の取替体数で調節することとした。具体的には、第1サイクルが終了すると、濃縮度3.5wt%の低濃縮 $\text{UO}_2$ 燃料集合体(Ⅱ)がすべて取り出され、180体のFLWR/MIX燃料集合体および180体の高濃縮燃料集合体(Ⅰ)が装荷される。第2サイクルが終了した時点では、2サイクル滞在した360体の燃料集合体(Ⅰ)が取り出され、180体のFLWR/MIX燃料集合体および180体の高濃縮燃料集合体(Ⅰ)が装荷される。さらに第3サイクルが終了した時点で、2サイクル滞在した180体の燃料集合体(Ⅰ)が取り出され、180体の

FLWR/MIX燃料集合体が装荷される。第4サイクルが終了した時点で、全てのUO<sub>2</sub>燃料集合体を取り出され、全ての燃料がMOX燃料集合体に置換わる。

移行サイクルでの反応度特性を図5.4に、移行サイクル炉心における炉心径方向出力分布を図5.5に示す。各運転サイクルとも、余剰反応度は約4%以内に収まっており、移行サイクルでのFLWR/MIX燃料集合体の取替体数を全MOX平衡サイクル炉心と同一の体数とするという制約条件を課した場合においても、全MOX炉心へスムーズに移行できる見通しが得られた。ボイド反応度係数も各サイクルを通じて負の値が維持されている。

また、第1サイクルに装荷したFLWR/MIX燃料集合体の平均燃焼度は、平衡サイクル炉心での取出燃焼度と同等の44GWd/tを達成可能である。

さらに、第1サイクルでの装荷するFLWR/MIX燃料集合体を極力減らした初装荷炉心概念は、FLWR導入時に必要なPu量を低減する観点からも有効である。

表 5.1 UO<sub>2</sub>燃料集合体を装荷した炉心の主要諸元

項 目	全 UO <sub>2</sub> 炉心	部分 MOX 炉心 I	部分 MOX 炉心 II	全 MOX 炉心
MOX 燃料装荷率 (%)	0	33	50	100
MOX 燃料集合体数/燃料交換バッチ数	0	300/5.0	450/5.0	900/5.0
MOX 燃料棒平均 Pu f 富化度 (wt%)	-	10.0	10.0	10.0
UO <sub>2</sub> 燃料棒 <sup>235</sup> U 濃縮度 (wt%)	-	4.95	4.95	4.95
UO <sub>2</sub> 燃料集合体数/燃料交換バッチ数	900/2.31	600/2.17	450/2.0	0
<sup>235</sup> U 濃縮度 (wt%)	4.95	4.95	4.95	-
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 入り燃料棒本数	18	24	24	-
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度 (wt%)	1.5	1.5	1.5	-
燃料有効長 (mm)	1250	1250	1250	1250
炉心流量 (10 <sup>3</sup> t/hr)	23.4	23.4	23.4	23.4
平均ボイド率 (%)	56	55.6	55.6	54.1
運転サイクル期間 (月)	14.5	14.5	15.5	17.4
MOX 集合体取出燃焼度 (GWd/t)	-	30	34	45
核分裂性 Pu 残存比	-	1.00	1.00	1.00
核分裂性物質残存比	-	0.92	0.91	0.89
UO <sub>2</sub> 集合体取出燃焼度 (GWd/t)	22	23	24	-
核分裂性物質残存比	0.79	0.79	0.78	-
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%void)	-13.8	-9.7	-7.0	-0.3

表 5.2 部分 MOX 初装荷炉心用燃料集合体の仕様

項目	FLWR/MIX 燃料集合体	UO <sub>2</sub> 燃料集合体 (I)	UO <sub>2</sub> 燃料集合体 (II)
装荷体数 (体)	180	360	360
全燃料棒本数 (本/集合体)	217	168	168
水ロッド本数 * ( ) 置換した燃料棒本数	0	7(49)	7(49)
MOX 燃料棒本数 核分裂性 Pu 平均富化度 (wt%)	151 10.0	-	-
UO <sub>2</sub> 燃料棒本数 <sup>235</sup> U 濃縮度 (wt%)	66 4.95	168 4.95	168 3.5
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 入り燃料棒本数 Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度 (wt%)	0 -	24 1.5	6 2.0

表 5.3 移行サイクルの燃料集合体数の変化と炉心解析結果

	第 1 サイクル	第 2 サイクル	第 3 サイクル	第 4 サイクル	第 5 サイクル
運転サイクル長(月)	18	18	18	18	18
FLWR/MIX 燃料集合体	180	360 (180)*	540 (180)	720 (180)	900 (180)
UO <sub>2</sub> 燃料集合体 (I)	360	540 (180)	360 (180)	180	0
UO <sub>2</sub> 燃料集合体 (II)	360	0	0	0	0
実効増倍率**					
BOC	1.0375	1.0344	1.0305	1.0310	1.0282
EOC	1.0035	1.0010	1.0060	0.9993	1.0000
ボイド反応度係数 (10 <sup>-4</sup> Δk/k/%void)	-11.8	-9.3	-6.1	-1.2	-0.3
サイクル末取出燃料の 平均燃焼度 (GWd/t)	12.2 (UO <sub>2</sub> )	21.4 (UO <sub>2</sub> )	22.0 (UO <sub>2</sub> )	23.4 (UO <sub>2</sub> )	45.5 (MOX)

注：\* ( ) 数値：サイクル初期に取替燃料として装荷した体数

\*\* 実効増倍率は、平衡サイクル末期の値を 1.0000 と規格化して表示

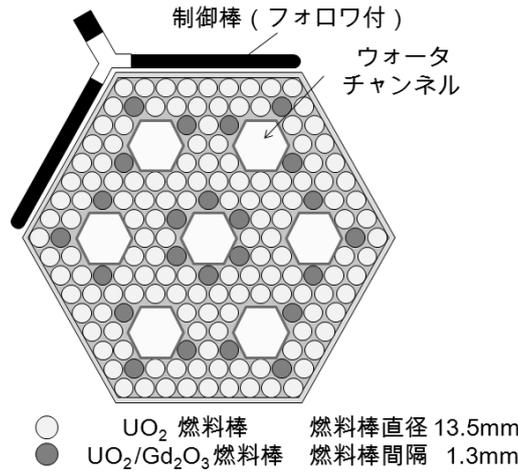


図5.1 稠密格子UO<sub>2</sub>燃料集合体の設計例

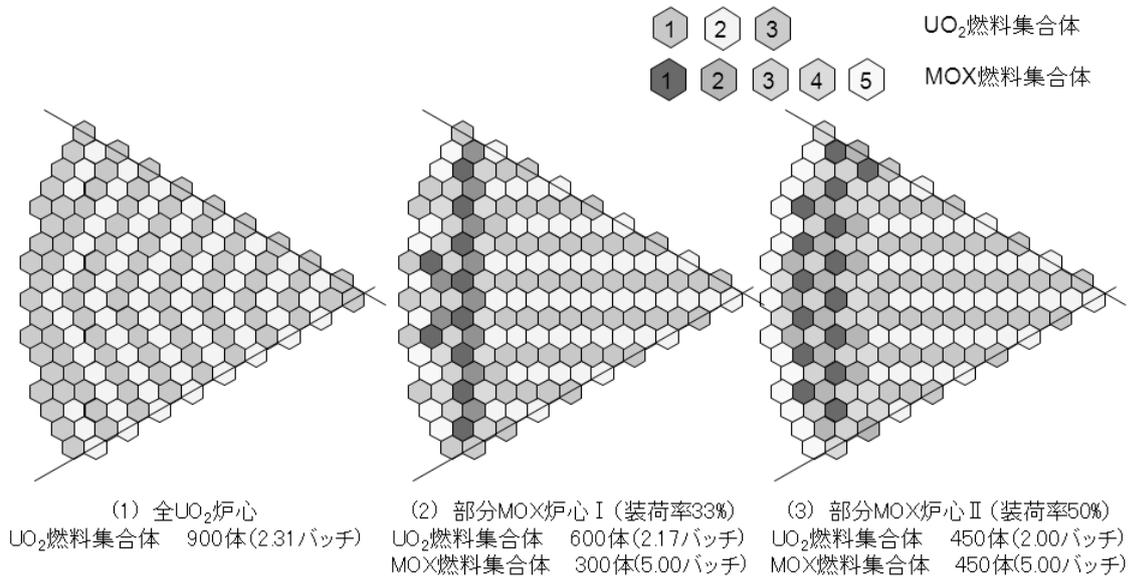


図5.2 部分MOX平衡サイクル炉心の構成

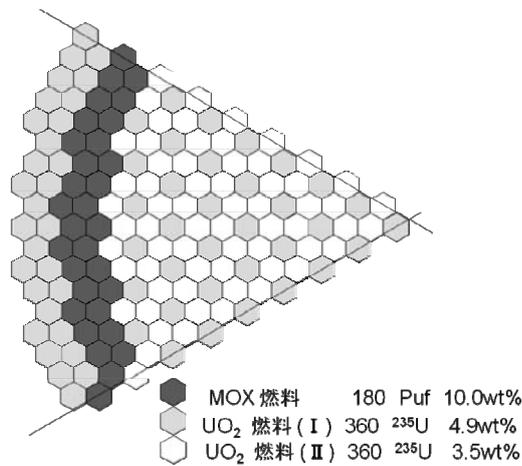


図5.3 部分MOX初装荷炉心の構成

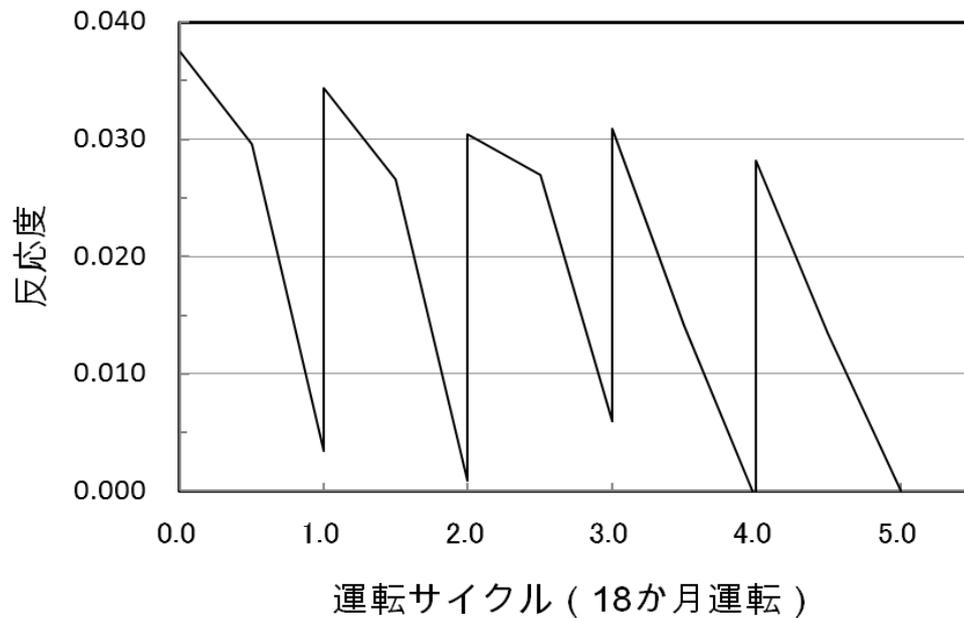


図5.4 移行サイクルにおける反応度変化

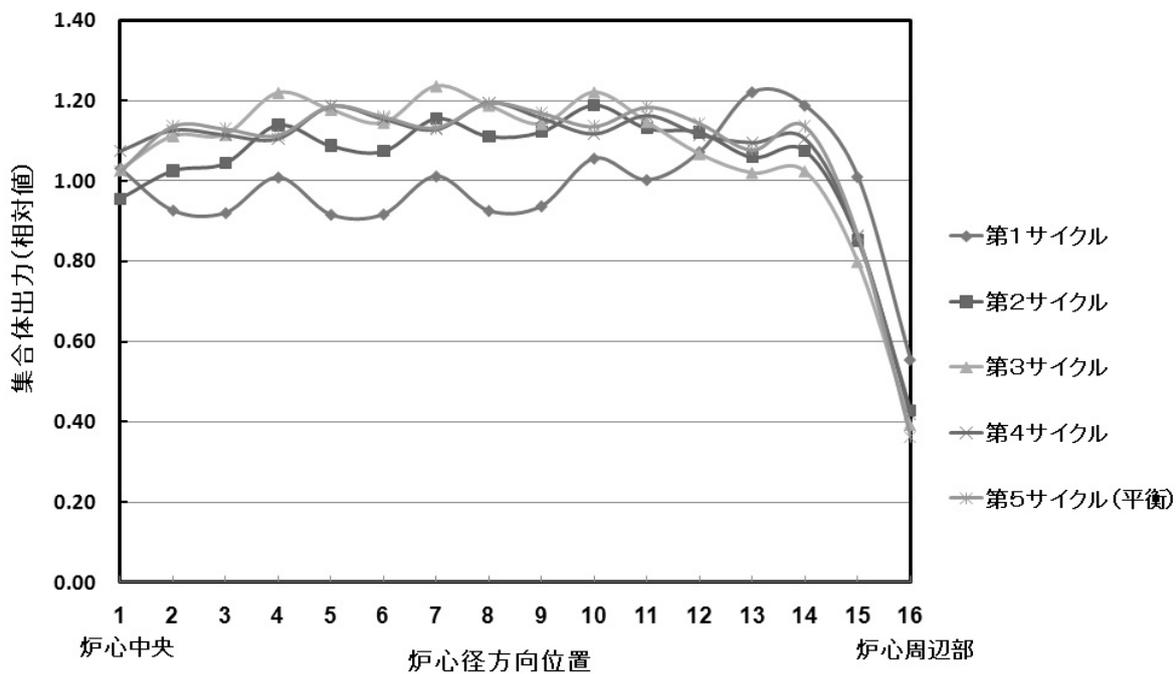


図5.5 移行サイクル炉心における炉心径方向出力分布

## 6. 結論

プルサーマル利用により確立される軽水炉燃料サイクル技術に立脚し、FLWRの第1ステップにおいて転換比を1.0近傍まで高めて効率的なプルトニウム利用を実現する燃料集合体概念として、MOX燃料棒と $\text{UO}_2$ 燃料棒を集合体内で非均質（アイランド型）に配置した設計概念（FLWR/MIX）の成立性を検討し、次の結論を得た。

（1）FLWR/MIX燃料集合体では、燃料集合体の外周部に配置する $\text{UO}_2$ 燃料棒の本数により、稠密格子燃料棒配列でのボイド反応度特性を制御することができ、MOX燃料棒のPu富化度やPu組成に対応して、炉心全体のボイド反応度係数を負に維持する柔軟な設計を実現できる。

（2）使用するMOX燃料ペレットの最大Pu富化度をプルサーマル用燃料加工施設での取扱可能範囲内としながら、ブランケットなしで核分裂性Pu残存比を1.0近傍まで高めることができる。

（3）軸方向ブランケットを設置して核分裂性Pu残存比を1.05程度まで高めた炉心設計や、 $\text{UO}_2$ 燃料棒に軽水炉使用済燃料の再処理により得られる回収ウランを利用した設計が可能である。

（4） $^{235}\text{U}$ 濃縮度5wt%以下の稠密格子 $\text{UO}_2$ 燃料集合体とFLWR/MIX燃料集合体から構成される部分MOX初装荷炉心の採用により、FLWR導入時に必要なPu量を低減することができる。

上記の特性により、六ヶ所再処理施設やMOX燃料加工施設等の軽水炉サイクルインフラを活用して、高速炉サイクルがめざす持続的Puリサイクル利用への移行を早期に実現する燃料および炉心概念として有効である。

## 参考文献

- 1) 岩村公道, 大久保努, 佐藤治: “革新的水冷却炉「低減速軽水炉」の研究開発”, 日本原子力学会誌, 45, No.3, 184(2003).
- 2) 大久保努, 師岡慎一, 竹田練三: “低減速炉の技術開発の進捗および課題—軽水炉技術によるプルトニウムのマルチリサイクルや増殖を目指して”, 日本原子力学会誌, 48, No.7, 484(2006).
- 3) 内川貞夫 他: “革新的水冷却炉（FLWR）による軽水炉プルトニウム利用技術の高度化(1) 革新的水冷却炉の全体構想”, 日本原子力学会「2005年春の大会」要旨集, F44(2005).
- 4) T. Iwamura, S. Uchikawa, T. Okubo, et al.: “Concept of innovative water reactor for flexible fuel cycle (FLWR),” Nucl. Eng. and Design, 236, pp.1599-1605 (2006).
- 5) S. Uchikawa, T. Okubo, et al.: “Conceptual Design of Innovative Water Reactor for Flexible Fuel Cycle (FLWR) and its Recycle Characteristics”, J. Nucl. Sci. Technol., 44, No.3, pp.277-284(2007).
- 6) Y. Nakano, H. Akie, T. Okubo, et al.: “Conceptual Design Study on High Conversion Type Core of

- FLWR,” Proc. 2007 Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP2007), Nice, France, May 13-18, 2007, #7011 (2007).
- 7) T. Okubo, T. Iwamura, R. Takeda, et al.: “Design Study on Reduced-Moderation Water Reactor (RMWR) Core for Plutonium Multiple Recycling,” Proc. Int. Conf. on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plant (GENES4/ANP2003), Kyoto, Japan, Sept. 15-19, 2003, #1145 (2003).
- 8) A. Ohnuki, et al.: “Development of Design Technology on Thermal-Hydraulic Performance in Tight Lattice Rod Bundles”, Proc. 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE15), Nagoya, Japan, April 22-26, 2007, #10087 (2007)
- 9) 将来型炉研究グループ, 炉物理研究グループ, 熱流体研究グループ, “低減速スペクトル炉心の研究—平成10～11年度報告書— (共同研究) ”, JAERI-Research 2000-035 (2000).
- 10) 奥村啓介 他: “モジュラー型炉心解析コードシステムMOSRAの開発”, 日本原子力学会「2008年春の年会」要旨集, L46(2008).
- 11) K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, et al., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3,” J. Nucl. Sci. Technol., 39, No.11, pp.1125-1136 (2002).
- 12) Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori, M. Nakagawa, MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods, JAERI 1348, Japan Atomic Energy Research Institute (2005).
- 13) 久保田修 他: “高燃焼度 BWR 燃料用材料の開発”, 日本原子力学会「2003 年秋の大会」要旨集、J11(2003)
- 14) 垣内一雄 他: “BWR 燃料用改良 Zr 合金(HiFialloy)の開発研究”, 日本原子力学会「2005 年春の年会」要旨集、E59(2005)

# 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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	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	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方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
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/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 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	ルクス	lx		lm/m <sup>2</sup>
放射線種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		m <sup>2</sup> cd s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m <sup>2</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		名称	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=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
リットル	L, l	1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガラ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

