

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公 開 特 許 公 報(A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2010-25948  
(P2010-25948A)

(43) 公開日 平成22年2月4日(2010.2.4)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G 2 1 C 3/328 (2006.01)	G 2 1 C 3/30 T	
G 2 1 C 5/00 (2006.01)	G 2 1 C 3/30 G D L D	
G 2 1 C 7/26 (2006.01)	G 2 1 C 3/30 X	
	G 2 1 C 5/00 A	
	G 2 1 C 7/26	
審査請求 有 請求項の数 13 O L (全 51 頁)		

(21) 出願番号	特願2009-249615 (P2009-249615)	(71) 出願人	000005108
(22) 出願日	平成21年10月30日 (2009.10.30)		株式会社日立製作所
(62) 分割の表示	特願2007-49190 (P2007-49190)		東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
	の分割	(74) 代理人	110000350
原出願日	平成19年2月28日 (2007.2.28)		ポレール特許業務法人
		(72) 発明者	竹田 練三
			茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株
			式会社日立製作所電力・電機開発研究所内
		(72) 発明者	三輪 順一
			茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株
			式会社日立製作所電力・電機開発研究所内
		(72) 発明者	守屋 公三明
			茨城県日立市幸町三丁目1番1号 株式会
			社日立製作所日立事業所内

(54) 【発明の名称】 軽水炉の炉心及び燃料集合体

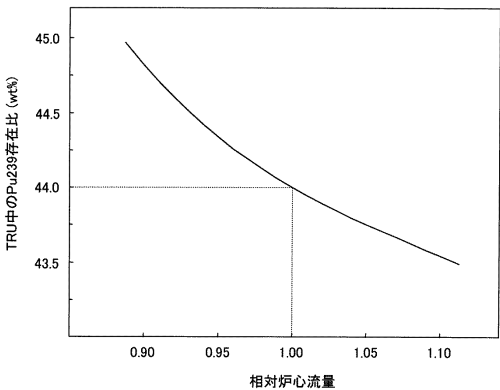
(57) 【要約】

【課題】安全上の制約条件を守りつつ核不拡散抵抗性をより大きくし、燃焼度をより高めることができ、かつ多重リサイクルを可能にする軽水炉の炉心及び燃料集合体を提供する。

【解決手段】BWRの炉心流量が、炉心に装荷される新燃料集合体に含まれるTRU中のPu-239の割合に応じて図2に示す特性から定まる設定炉心流量になるように調節される。BWRの各運転サイクルを通して炉心に炉心流量が設定炉心流量に保持される。これによって、BWR炉心から使用済み燃料集合体として取り出された時点でこの燃料集合体が含まれているTRUの複数の同位元素の割合が、その燃料集合体がBWR炉心に装荷される新燃料集合体の状態で含んでいるTRUのそれらの同位元素の割合と実質的に同じになる。新燃料集合体に含まれるTRU中のPu-239の割合は、3%以上45%以下である。

【選択図】図2

図 2



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体は、この燃料集合体に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 45 % 以下の範囲にあることを特徴とする軽水炉の炉心。

**【請求項 2】**

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体は、この燃料集合体に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 45 % 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出された前記燃料集合体内に存在する前記超ウラン核種の複数の同位元素の割合が前記炉心に装荷される燃焼度ゼロの前記燃料集合体内に存在する前記複数の同位元素の割合と実質的に同一になることを特徴とする軽水炉の炉心。

10

**【請求項 3】**

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体は、この燃料集合体に含まれる全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 50 % 以下の範囲にあり、かつ、全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-240$  の割合が 35 % 以上 45 % 以下の範囲にあることを特徴とする軽水炉の炉心。

**【請求項 4】**

20

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体は、この燃料集合体に含まれる全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 50 % 以下の範囲にあり、かつ、全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-240$  の割合が 35 % 以上 45 % 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出された前記燃料集合体内に存在する前記超ウラン核種の複数の同位元素の割合が前記炉心に装荷される燃焼度ゼロの前記燃料集合体内に存在する前記複数の同位元素の割合と実質的に同一になることを特徴とする軽水炉の炉心。

**【請求項 5】**

全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 40 % 以上 45 % 以下の範囲にある請求項 1 ないし請求項 4 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

30

**【請求項 6】**

全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 40 % 未満の範囲にある請求項 1 ないし請求項 4 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

**【請求項 7】**

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 40 % 以上 45 % 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出された前記燃料集合体内に存在する前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が、40 % 以上 45 % 以下になることを特徴とする軽水炉の炉心。

**【請求項 8】**

40

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 15 % 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出された前記燃料集合体内に存在する前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が、3 % 以上 15 % 以下になることを特徴とする軽水炉の炉心。

**【請求項 9】**

チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有する前記燃料集合体は、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が 30 % 以上 55 % 以下である請求項 1 ないし請求項 8 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

50

## 【請求項 10】

上部ブランケット領域、上部燃料領域、内部ブランケット領域、下部燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に、上方より配置されている請求項 1 ないし請求項 9 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 11】

上部ブランケット領域、燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に上方より配置されている請求項 1 ないし請求項 9 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 12】

チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有する前記燃料集合体は、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が 30% 以上 55% 以下の範囲にあり、

燃焼度ゼロの前記燃料集合体はこの燃料集合体に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める Pu - 239 の割合が 3% 以上 15% 以下の範囲にある請求項 1 ないし請求項 4 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 13】

前記炉心が、上部ブランケット領域、上部燃料領域、内部ブランケット領域、下部燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に上方より配置されたパuffエ型炉心である請求項 12 に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 14】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃料物質に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める Pu - 239 の割合が 3% 以上 45% 以下の範囲にあることを特徴とする燃料集合体。

## 【請求項 15】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃料物質に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める Pu - 239 の割合が 3% 以上 45% 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出されたときに前記核燃料物質に含まれる前記超ウラン核種の複数の同位元素の割合が前記炉心に装荷される燃焼度ゼロのときに前記核燃料物質に含まれる前記複数の同位元素の前記割合と実質的に同一になることを特徴とする燃料集合体。

## 【請求項 16】

燃焼度がゼロのとき、全ての前記超ウラン核種中に占める Pu - 239 の割合が 40% 以上 45% 以下の範囲にある請求項 14 または請求項 15 に記載の燃料集合体。

## 【請求項 17】

燃焼度がゼロのとき、全ての前記超ウラン核種中に占める Pu - 239 の割合が 3% 以上 40% 未満の範囲にある請求項 14 または請求項 15 に記載の燃料集合体。

## 【請求項 18】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃料物質に含まれる全ての Pu 中に占める Pu - 239 の割合が 3% 以上 50% 以下の範囲にあり、かつ、全ての Pu 中に占める Pu - 240 の割合が 35% 以上 45% 以下の範囲にあることを特徴とする燃料集合体。

## 【請求項 19】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃料物質に含まれる全ての Pu 中に占める Pu - 239 の割合が 3% 以上 50% 以下の範囲にあり、かつ、全ての Pu 中に占める Pu - 240 の割合が 35% 以上 45% 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出されたときに前記核燃料物質に含まれる前記超ウラン核種の複数の同位元素の割合が前記炉心に装荷される燃焼度ゼロのときに前記核燃料物質に含まれる前記複数の同位元素の前記割合と実質的に同一になることを特徴とする燃料集合体。

## 【請求項 20】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃

10

20

30

40

50

料物質に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 40% 以上 45% 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出されたときに前記核燃料物質に含まれる前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が、40% 以上 45% 以下になることを特徴とする燃料集合体。

【請求項 21】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃料物質に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3% 以上 15% 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出されたときに前記核燃料物質に含まれる前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が、3% 以上 15% 以下になることを特徴とする燃料集合体。

10

【請求項 22】

チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有し、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が 30% 以上 55% 以下である請求項 14 ないし請求項 21 のいずれか 1 項に記載の燃料集合体。

【請求項 23】

上部ブランケット領域、上部燃料領域、内部ブランケット領域、下部燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に上方より燃料有効長の領域に配置されている請求項 14 ないし請求項 22 のいずれか 1 項に記載の燃料集合体。

【請求項 24】

上部ブランケット領域、燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に上方より燃料有効長の領域に配置されている請求項 14 ないし請求項 22 のいずれか 1 項に記載の燃料集合体。

20

【請求項 25】

燃焼度ゼロの状態では、各前記ブランケット領域は劣化ウランを含み前記超ウラン核種を含んでいなく、各前記燃料領域は前記同位元素を含む前記核燃料物質を含んでいる請求項 23 または請求項 24 に記載の燃料集合体。

【請求項 26】

燃焼度がゼロのとき、全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3% 以上 15% 以下の範囲にある請求項 17 に記載の燃料集合体。

30

【請求項 27】

超ウラン核種を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、前記炉心に装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体に含まれる全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-239$  の割合が 40% 以上 50% 以下の範囲にあり、前記全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-240$  の割合が 35% 以上 45% 以下の範囲にあり、チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有する前記燃料集合体は、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が 30% 以上 55% 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出された前記燃料集合体内に存在する前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が、40% 以上 50% 以下になることを特徴とする軽水炉の炉心。

40

【請求項 28】

超ウラン核種を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、前記炉心に装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体に含まれる全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-239$  の割合が 3% 以上 15% 以下の範囲にあり、かつ、前記全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-240$  の割合が 35% 以上 45% 以下の範囲にあり、チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有する前記燃料集合体は、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が 30% 以上 55% 以下の範囲にあり、前記炉心から取り出された前記燃料集合体内に存在する前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が、3% 以上 15% 以下になることを特徴とする軽水炉の炉心。

50

## 【請求項 29】

チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有する前記燃料集合体は、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が30%以上55%以下の範囲にある請求項27または請求項28に記載の軽水炉の炉心。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、軽水炉の炉心及び燃料集合体に係り、特に、沸騰水型原子炉の炉心に適用するのに好適な軽水炉の炉心及び燃料集合体に関する。

10

## 【背景技術】

## 【0002】

多くの同位元素があるアクチニド核種は、軽水炉の炉心内に装荷された燃料集合体内の核燃料物質に含まれた状態で炉心内にて燃焼されるとき、核分裂及び中性子の吸収等の核変換により、同位元素間を順次移行する。アクチニド核種として、共鳴領域及び熱中性子に対して大きな核分裂断面積を有するいわゆる奇数核、及び高速中性子に対してのみ核分裂するいわゆる偶数核が存在するため、一般に燃焼とともに燃料集合体に含まれたアクチニド核種の各同位元素の存在割合が大きく変化する。この存在割合の変化は、炉心内における燃料集合体の装荷位置での中性子エネルギースペクトルに依存することが知られている。

20

## 【0003】

現在の軽水炉は、低濃縮ウランを核燃料として使用している。しかしながら、天然のウラン資源は有限であるので、軽水炉に用いられる燃料集合体を、ウラン濃縮時の残渣である劣化ウランに、軽水炉の使用済み燃料集合体から抽出された超ウラン核種（以下、TRUという）を富化した核燃料物質を用いるリサイクル型燃料集合体に順次置き換えていく必要がある。商用炉が必要であると予想されるかなり長い期間にわたってTRUは有効な資源としてリサイクルされ、その間、常にTRUの量が増加するかほぼ一定に保たれていることが必要である。現在商用炉の大部分を占めている軽水炉で、核燃料の燃焼を通じて核分裂性Pu量が増加またはほぼ一定である増殖炉を実現する技術が、特許文献1に記載されている。特許文献1及び非特許文献1に記載されている増殖炉を実現した軽水炉は、複数の燃料棒を三角格子で稠密に配列した、横断面が六角形をしている複数の燃料集合体を、炉心に配置している。この軽水炉の炉心は、燃料棒の稠密配置によって燃料棒周りの水の量を少なくして共鳴及び高速エネルギー中性子の割合を増やすとともに、TRUの混合酸化物燃料部の高さを低くしてその上下に劣化ウランのブランケット領域を配置し、安全基準である負のボイド係数を維持している。その炉心は、さらに、非特許文献2に記載されたパフエ型炉心の概念を適用して炉心部を二段重ねとして経済性を確保しつつ、増殖比を1以上にしている。

30

## 【0004】

TRUをリサイクルするためには使用済み燃料の再処理が不可欠である。しかしながら、民生用のTRUが大量破壊兵器に転用される恐れから核不拡散に対する要求がますます厳しくなり、TRUリサイクル時の制約が厳しくなっている。

40

## 【0005】

また、将来のいつの日かに、核分裂炉に代わるより優れた発電システムが実用化されるときが必ず来るので、その時にはTRUは濃縮ウランに相当するきわめて有用な核燃料から厄介ものの長寿命廃棄物に成り下がることになる。したがって、TRUの処分方法を準備することが原子力開発の最重要課題になっている。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0006】

【特許文献1】特許3428150号公報

50

## 【非特許文献】

## 【0007】

【非特許文献1】R. TAKEDA et al., Proc. of International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems. GLOBAL '95 Versailles, France, September, 1995, P.938

【非特許文献2】G. A. Ducat et al., 「EVALUATION OF THE PARFAIT BLANKET CONCEPT FOR FAST BREEDER REACTORS」, MITNE-157, January, 1974

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0008】

10

現在時点では、軽水炉の使用済み燃料に含まれたTRUのうちPuのみを一度だけ燃焼させた実績はあるが、Pu及びTRUのマルチリサイクルは不可能と考えられている。TRUの燃焼には高速中性子場が有効との考えから、未臨界体系と大型加速器を組み合わせで(ADS) 正の反応度係数を持つ体系でも加速器からのビームを止めることで安全性を確保する方法とFBRの二本立てで開発が進められている。しかしながら、これの開発は、TRUの一部減量のシナリオに留まっている。

## 【0009】

特許文献1及び公開文献1に記載されているTRUをリサイクルする軽水炉では、軽水炉の熱的制限としては燃料ペレットの中心温度を規定する最大線出力密度(MLHGR)及び燃料棒被覆管のバーンアウトを防ぐ最小限界出力比(MCPR)があり、MCPRの制限のために炉心性能の向上が妨げられていた。また、リサイクル時代に至る過程においては、ウラン燃料が装荷された、軽水炉の炉心から、各同位元素の割合が異なるTRUが供給される。このため、安全上の重要な制約条件である各種の反応度係数が悪化して制約条件に対する裕度が減少するので、リサイクルを中断せざるをえなくなり、多重リサイクルが実現できなくなる可能性がある。

20

## 【0010】

最近、世界的に核不拡散に対する関心が高くなり、大量破壊兵器に転用の可能性のあるTRUの民生利用が困難になりつつある。このため、リサイクルするTRUの中でPu-239の割合が小さい核拡散抵抗性の高いTRUをリサイクルできるシステムが求められている。

30

## 【0011】

TRUを消滅させたいときにリサイクルを繰り返すと、核分裂性の奇数核種だけが先に消滅して高速エネルギーの中性子でしか核分裂しない偶数核種の割合が増大する。これにより、臨界性が保てなくなって核分裂連鎖反応を継続できなくなったり、安全上の制約条件である反応度係数が正になったりして、途中でTRUの消滅作業を中途半端な状態で放棄せざるをえなくなる等で、多重リサイクルを実現する上での解決すべき課題を有している。

## 【0012】

本発明の目的は、安全上の制約条件を守りつつ核不拡散抵抗性をより大きくし、燃焼度をより高めることができ、かつ多重リサイクルが可能な軽水炉の炉心及び燃料集合体を提供することにある。

40

## 【課題を解決するための手段】

## 【0013】

上記した目的を達成できる本発明の特徴は、炉心に装荷された燃焼度ゼロの燃料集合体に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占めるPu-239の割合が3%以上45%以下の範囲にあることにある。

## 【発明の効果】

## 【0014】

本発明によれば、安全上の制約条件を守りつつ核不拡散抵抗性をより大きくし、燃焼度をより高めることができ、かつ多重リサイクルが可能になる。

50

## 【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 5 】

【図 1】アクチニド核種の生成崩壊チェーンを示す説明図である。

【図 2】相対炉心流量と T R U 中の P u 2 3 9 の割合（存在比）との関係を示す特性図である。

【図 3】T R U 中の P u 2 3 9 の存在比に対する水対燃料物質比の関係を示す特性図である。

【図 4】T R U 中の P u 2 3 9 の存在比と燃焼効率及びボイド係数の関係を示す特性図である。

【図 5】本発明の好適な一実施例である実施例 1 の軽水炉の構成図である。

10

【図 6】図 5 に示す炉心の横断面図である。

【図 7】図 6 に示す燃料集合体格子を示す説明図である。

【図 8】図 6 に示す炉心の平衡炉心状態における燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 9】図 8 に示す平衡炉心におけるオリフィスの開口分布を示す説明図である。

【図 10】図 6 に示す炉心の平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 11】図 7 に示す燃料集合体の横断面における核分裂性 P u の富化度が異なる各燃料棒の配置を示した説明図である。

【図 12】図 5 に示す炉心の軸方向における出力分布及びボイド率分布を示す説明図である。

20

【図 13】本発明の他の実施例である実施例 2 の軽水炉の平衡炉心における燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 14】図 13 に示す炉心の平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 15】本発明の他の実施例である実施例 3 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

【図 16】実施例 3 の軽水炉の平衡炉心における燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 17】図 16 に示す炉心の平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 18】本発明の他の実施例である実施例 4 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

30

【図 19】実施例 4 の軽水炉の平衡炉心における燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 20】図 19 に示す炉心の平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 21】本発明の他の実施例である実施例 5 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

【図 22】実施例 5 の軽水炉の炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 23】本発明の他の実施例である実施例 6 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

40

【図 24】実施例 6 の軽水炉の平衡炉心における燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 25】図 24 に示す炉心の平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 26】本発明の他の実施例である実施例 7 の軽水炉における炉心の横断面図である。

【図 27】図 26 に示す炉心における燃料集合体格子を示す説明図である。

【図 28】図 26 に示す炉心の平衡炉心状態での燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 29】図 28 に示す平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 30】本発明の他の実施例である実施例 8 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

50

【図 3 1】実施例 8 の軽水炉の平衡炉心における燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 3 2】図 3 1 に示す平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 3 3】本発明の他の実施例である実施例 9 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

【図 3 4】実施例 9 の軽水炉の平衡炉心における燃料集合体の配置を示す説明図である。

【図 3 5】図 3 4 に示す平衡炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 3 6】本発明の他の実施例である実施例 1 0 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

10

【図 3 7】実施例 1 0 の軽水炉の炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 3 8】本発明の他の実施例である実施例 1 1 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

【図 3 9】実施例 1 1 の軽水炉の炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【図 4 0】本発明の他の実施例である実施例 1 2 の軽水炉における燃料集合体格子を示す説明図である。

【図 4 1】実施例 1 2 の軽水炉の炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

20

【図 4 2】本発明の他の実施例である実施例 1 3 の軽水炉の炉心に装荷する新燃料集合体の軸方向における核分裂性 P u の富化度分布を示す説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

T R U を増殖することを目指した N a 冷却高速炉は、増殖比を高くするため一回の核分裂あたりに発生する中性子数を表す 値が大きい高速中性子領域での場の中性子束が出来るだけ高くなるように設計されている。その高速炉は、臨界性を保つために重要な核分裂性 P u 、すなわち P u - 2 3 9 、 P u - 2 4 1 にのみ注目して設計されていた。軽水増殖炉でも、この考え方が踏襲され、場の中性子エネルギーを高くするために中性子を減速させる水の量を燃料棒の冷却に必要な最小限にとどめていた。しかし、熱中性子炉に分類されている軽水炉で冷却材として用いられる軽水は、他の炉型の重水、黒鉛、N a 及び P b 等の冷却材と比べて、以下に示す二つの点で大きな特徴を有している。第 1 の特徴は、中性子の減速材である軽水の水素原子が中性子と同程度の質量を有しかつ高い減速能を有するので、偶数核種が奇数核種に移行するための中性子捕獲断面積の主要部分を占める共鳴及び熱エネルギー領域に多くの中性子を供給できることである。第 2 の特徴は、水素原子の散乱断面積が熱エネルギーから 1 0 k e V 付近までは約 2 0 バーンと大きな値であるが、その散乱断面積が 1 0 k e V 付近から急激に減少し始めて 2 0 0 k e V で 1 0 バーン、4 M e V 以上で 2 バーン以下となり N a の全断面積より小さくなって 1 0 M e V では 1 バーンにまで減少するので、0 . 1 M e V 以上の高速中性子束は他の体系よりも高くなり、偶数核種の高速核分裂に寄与する高エネルギー領域にも多くの中性子を供給することができる。

30

40

【0017】

発明者らは、上記した第 1 及び第 2 の特徴を十分考慮し、核分裂性 P u だけではなく T R U 全核種に着目し、軽水炉の一種である沸騰水型原子炉 ( B W R ) の特徴である炉心冷却水が各燃料集合体のチャンネルボックスで分離されているため燃料集合体内部の構造が異なる燃料燃料集合体を一つの炉心に装荷することが可能であり、同位元素割合が異なる燃料集合体を炉心に装荷する必要がある場合にその集合体の水対燃料体積比を変えて中性子エネルギースペクトルを変化させて望ましい同位元素比に移行させながら使用したり、炉心流量制御により中性子エネルギースペクトルを変える機能を用いて同位元素割合を調整し、各サイクル各サイクルの間で T R U の同位元素比を実質的に一定でリサイクルするこ

50



とにより、TRU中のPu-239の存在比を一定値以下にすれば、負のボイド係数を保ちつつ十分な熱的余裕の下でTRUを増加させたり一定に保ったり速やかに減少させたりできる軽水炉を提供できることを新たに見出した。

【0018】

本発明はリサイクル型軽水炉の機能拡張及び性能向上をめざしたものである。このような本発明は、特許文献1に示す軽水炉で増殖炉としての性能を向上させる場合、及び不要になったときに長寿命放射性廃棄物として処分することが検討されているTRUを核燃料として利用しつつ最後に一炉心分のTRU以外のTRUをすべて核分裂させる場合において、TRUを含む燃料集合体の燃焼度をより高め、TRUの多重リサイクルを可能にするために成されたものである。

10

【0019】

ここで、パフエ型炉心の概要について説明する。パフエ型炉心は、装荷される新燃料集合体（燃焼度がゼロ）として、下端部から上端部に向かって下部ブランケット領域、下部燃料領域、内部ブランケット領域、上部燃料領域及び上部ブランケット領域をこの順で配置した燃料集合体を用いている。このため、パフエ炉心も、下端部から上端部に向かって下部ブランケット領域、下部燃料領域、内部ブランケット領域、上部燃料領域及び上部ブランケット領域が形成される。下部燃料領域及び上部燃料領域は、TRU酸化物燃料（またはTRU酸化物とウラン酸化物の混合酸化物燃料）を含んでいる。なお、上部ブランケット領域と下部ブランケット領域の間に、内部ブランケット領域が存在しなく1つの燃料領域が存在する炉心を一領域炉心と称する。この一領域炉心の燃料領域もTRU酸化物燃料（またはTRU酸化物とウラン酸化物の混合酸化物燃料）を含んでいる。

20

【0020】

本発明は、上記したリサイクル型の軽水炉及び軽水炉の炉心を対象としている。以下に、発明者らの検討結果を説明する。電気出力が1350MWで、炉心に装荷されている720体の燃料集合体及び燃料集合体当たり271本の燃料棒を有する増殖比1.01のBWR炉心を例に挙げて説明する。

【0021】

このBWR炉心では、特許文献1及び非特許文献1に記載されている上部及び下部ブランケット領域を除く上部及び下部燃料領域及び内部ブランケット領域を含む炉心部領域の燃焼度が45GWd/tである燃料集合体をさらに高燃焼度化するとき、従来の燃料集合体のまま高燃焼度化すると、以下に示す問題が生じる。この問題は、臨界を保つための反応度の不足、Puの同位元素比の劣化、増殖比の低下、及び安全上の指標であるボイド係数が正になる等が原因で、TRUのリサイクルを途中で中止せざるを得なくなることである。すなわち、多重リサイクルが不可能になる。

30

【0022】

上記のBWR炉心を有するBWRを安全に運転しながらTRUのリサイクルを続けるためには、ボイド係数を所定の範囲に保つ必要がある。発明者らは、検討の結果、BWR固有の機能である炉心流量を所定の値に設定して炉心のボイド率を調整し、結果として中性子エネルギースペクトルを調整することによって、燃料集合体の燃焼度をより高めることができ、かつ、TRUの多重リサイクルを実現できることを新たに見出したのである。発明者らが見出した炉心流量の設定を行うことによって、ある運転サイクルでのBWRの運転終了時における、BWR炉心内に存在するTRUの複数の同位元素の割合を、その運転サイクルでのBWRの運転が開始できる状態、例えば、その運転サイクルでの運転開始直前における、そのBWR炉心内に存在するTRUのそれらの同位元素の割合と実質的に同じくすることができるという新たな知見が発明者らによって見出された。ボイド係数も、その運転サイクルにおいて所定の範囲（実質的に一定）に保持することが可能になる。そのBWR炉心には、上記の運転開始直前において、新燃料集合体（燃焼度がゼロである燃料集合体）、及び少なくとも1つの運転サイクルの間、炉心内に滞在した燃料集合体が装荷されている。BWR炉心に装荷されたある燃料集合体に着目すれば、この燃料集合体は、使用済燃料としてBWR炉心から取り出されるまでの間に、炉心内で、例えば、4つの

40

50

運転サイクルでの運転を経験することになる。発明者らが見出した上記の炉心流量の調整を行うことによって、BWR炉心から使用済み燃料として取り出された時点でその燃料集合体が含まれているTRUの複数の同位元素の割合を、その燃料集合体がBWR炉心に装荷される新燃料集合体の状態で含んでいるTRUのそれらの同位元素の割合と実質的に同じくすることができるのである。新燃料集合体は、原子炉内での運転を経験していない燃焼度がゼロの燃料集合体である。

#### 【0023】

上記したある運転サイクルでのBWRの運転終了時における、BWR炉心内に存在するTRUの複数の同位元素の割合を、その運転サイクルでのBWRの運転が開始できる状態における、そのBWR炉心内に存在するTRUのそれらの同位元素の割合と実質的に同じくすることを、便宜的に、TRU同位元素の割合保持と称する。また、BWR炉心から使用済み燃料として取り出された時点で燃料集合体が含まれているTRUの複数の同位元素の割合を、その燃料集合体がBWR炉心に装荷される新燃料集合体の状態で含んでいるTRUのそれらの同位元素の割合と実質的に同じくすることも、TRU同位元素の割合保持の別の見方である。

#### 【0024】

上記したBWRでの上記した炉心流量の調節は、図2に示す特性によって定まる相対流量になるように行われる。図2は、炉心に装荷される新燃料集合体に含まれるTRU中のPu-239の割合と相対炉心流量との関係を示している。図2は新燃料集合体に含まれるTRU中のPu-239の割合が異なるTRU同位元素の割合を保持できる炉心流量を求めたものである。発明者らは、軽水炉で発生した使用済燃料集合体に含まれるTRUの各同位元素の組成を調査した結果、TRU中のPu-239の割合に着目して炉心流量を設定すれば、TRU同位元素の割合保持を実現できることを新たに見出したものである。上記した炉心流量の設定は、各運転サイクルにおけるボイド係数を所定の範囲に保持するために行うものであって、炉心に装荷される新燃料集合体に含まれるTRU中のPu-239の割合によって図2により定まる相対炉心流量（設定炉心流量という）に基づいて行われる。各運転サイクルにおいて、原子炉出力が少なくとも定格出力になった時点では炉心流量は少なくとも調整が完了して上記の設定炉心流量になっている。炉心流量は、運転サイクルが終了するまで、その設定炉心流量に保持される。このため、原子炉出力の制御は、制御棒を用いて行われる。

#### 【0025】

反応度の不足を解消する他の対策案として、各燃料棒においてTRU中のPu-239の割合を大きくすることが考えられる。この他の対策案では、1つの運転サイクルの運転終了時での炉心内におけるTRUの各同位元素の割合を、その運転サイクルの運転開始時でのその割合と実質的に同じにすることができなくなる。それらを実質的に同じにしようとする、炉心流量を設定炉心流量から減らす必要がある、熱的制限条件の一つであるMCPRの基準を満たせなくなる。発明者らの検討の結果、図2に示すように新燃料集合体に含まれる全TRU中のPu-239の割合を45%以下に下げることにより、全ての制約条件を満たし増殖比1.01を維持しつつ燃料集合体の高燃焼度化等の炉心性能の向上を図ることができると共に、TRUの多重リサイクルを実現することができた。なお、燃料集合体の燃焼度をより高め、かつTRUの多重リサイクルを実現してTRUの有効利用を図るためには、新燃料集合体に含まれる全TRU中のPu-239の割合を40%以上で45%以下の範囲にすることが望ましい。その割合をその範囲にすることによって、BWR炉心内のTRUの量を、運転サイクルの開始時よりも減少させることなく、運転サイクルの終了時まで一定に保持でき、場合によっては運転サイクル終了時に増大させることができる。

#### 【0026】

次に、電気出力が1350MWで、燃料集合体1体当たり331本の燃料棒を有する720体の燃料集合体が装荷されている他のBWR炉心を例に挙げて説明する。このBWR炉心は、TRUを消滅させる機能を有する。

## 【 0 0 2 7 】

T R Uを減少させる目的でT R Uのリサイクルを繰り返す場合には、通常、奇数核種だけが先に燃えて途中で未臨界になり、T R Uが燃え残るという問題が生じる。この問題は、発明者らが見出した上記したT R U同位元素の割合保持によってT R Uの各同位元素の割合を実質的に一定に保ち、T R Uを燃焼させることによって解決できる。このため、燃料集合体の燃焼度をより高めることができ、かつT R Uの多重リサイクルを実現させることができる。しかし、T R Uを減少させるためにはT R U中の全T R Uに占めるP u - 2 3 9の割合を低下させ、リサイクルのたびに新たにU - 2 3 8から供給されるP u - 2 3 9の量を少なくする必要がある。

## 【 0 0 2 8 】

10

図 3 は、パフエ型炉心及び一領域炉心において、装荷される新燃料集合体に含まれるT R U中のP u - 2 3 9の割合と、水対核燃料物質比（単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合）との関係を示している。図 3 に示されたこれら関係は、それぞれの炉心においてT R U同位元素の割合保持が実現されることを前提にして、発明者らが求めたものである。特性 4 1 は、パフエ型炉心に対するものであり、特性 4 2 は一領域炉心に対するものである。図 3 に示すように新燃料集合体内の燃料棒を細径化することによってT R Uに対する水の割合が増加（水対核燃料物質比が低下）するので、共鳴領域及び熱エネルギー領域の各中性子が増加する。これらの中性子の増加によって偶数核種の中性子捕獲が進み、偶数核種から奇数核種への核変換効率が向上してT R Uの燃焼効率が増加する。したがって、T R Uをより早く減少させることができる。なお、T R Uの燃焼効率は、燃料集合体の寿命中における全核分裂量に対するT R Uの正味の減少量で定義される。

20

## 【 0 0 2 9 】

図 4 は、パフエ型炉心及び一領域炉心において、装荷される新燃料集合体に含まれるT R U中のP u - 2 3 9の割合と、燃焼効率及びボイド係数との関係を示している。T R U中のP u - 2 3 9の割合と燃焼効率の関係は、パフエ型を対象とした特性 1 0 及び一領域炉心を対象とした特性 4 3 で表される。T R U中のP u - 2 3 9の割合とボイド係数との関係は、パフエ方炉心を対象とした、炉心取出燃焼度 4 7 G W d / t の特性 1 1 及び炉心取出燃焼度 6 5 G W d / t の特性 1 2、及び一領域炉心を対象とした炉心取出燃焼度 7 5 G W d / t の特性 4 4 で表される。図 4 に示すようにP u - 2 3 9が少なくなった体系でのボイド係数は、燃焼中のT R Uの各同位元素の割合が実質的に一定に保たれている限りにおいては、P u - 2 3 9が少なくなればなるほど正のボイド反応度成分を有する高速エネルギー成分が増殖比 1 の炉心より相対的に少なくなるので、負に維持される。また、炉心内の水の量は増殖比 1 の炉心におけるその量よりも多くなるのでM C P Rについても問題ない。一方、パフエ型炉心では全T R Uに占めるP u - 2 3 9の割合が 8 % 未満になると高速エネルギー領域でしか核分裂しない偶数核種の割合が多くなるため臨界を維持するのに炉心の高さが高くなりボイド反応率が正になるので、軽水炉の安全基準を満たせなくなる。パフエ型炉心よりも炉心の高さが低くボイド反応率がより負である一領域炉心も、全T R Uに占めるP u - 2 3 9の割合が 3 % 未満になるとやはりボイド反応率が正になるので、軽水炉の安全基準を満たせなくなる。軽水炉の安全基準を満足するためには、全T R Uに占めるP u - 2 3 9の割合を、パフエ方炉心で 8 % 以上、一領域炉心で 3 % 以上にすることが必要である。炉心内のT R Uを減少させるためには、パフエ型炉心は全T R Uに占めるP u - 2 3 9の割合を 8 % 以上 4 0 % 未満にし、一領域炉心はその割合を 3 % 以上 4 0 % 未満にしなければならない。しかし、一領域炉心は炉出力が小さいため、全T R Uに占めるP u - 2 3 9の割合が 8 % より大きいところでは、T R Uの燃焼効率が少し高くても、T R Uの正味の減少量が低下する。その割合を 3 % 以上 8 % 以下にすることによって、T R Uの燃焼効率をさらに大きくすることができ、T R Uの正味の減少量も増大させることができる。なお、全T R Uに占めるP u - 2 3 9の割合が、 3 % 以上 4 0 % 未満の範囲で 1 5 % 以下になるとT R Uの燃焼効率が著しく大きくなるので、T R Uを急激に減らすことができる。

30

40

50

## 【 0 0 3 0 】

どちらの炉心も、チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合が55%を超えると燃料棒相互の間隙が1mm未満となるので燃料集合体の組み立てが極めて困難になる。このため、単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は、55%以下にする必要がある。その面積割合が30%未満になると、燃料棒が細くなりすぎて横断面での核燃料物質の量が少なくなるので、燃料棒の長さを長くする必要があり、ボイド係数が正になる。したがって、その面積割合は30%以上にしなければならない。

## 【 0 0 3 1 】

T R Uを再処理してマイナーアクチニドを取り除いた核燃料物質を用いて製造した新燃料集合体を炉心（例えば、パフエ型炉心）に装荷することも可能である。このような炉心においても、炉心内に装荷するその新燃料集合体に含まれる全P u中のP u - 2 3 9の割合に対応して定められる設定炉心流量になるように炉心流量を調節することによって、上記したT R U同位元素の割合保持を実現できる。核燃料物質としてマイナーアクチニドを取り除いた核燃料物質を用いる場合において、燃料集合体の燃焼度をより高め、かつT R Uの多重リサイクルを実現するためには、新燃料集合体に含まれる全P u中のP u - 2 3 9の割合を3%以上50%以下及びその全P u中のP u - 2 4 0の割合を35%以上45%以下にする必要がある。P u - 2 3 9の割合が50%を超えた場合には、除熱能力が低下するので、原子炉出力を定格出力よりも下げる必要がある。したがって、B W Rが保有する発電能力を十分に活用することができなくなる。以上の理由により、そのP u - 2 3 9の割合は、50%以下にする必要がある。また、全P u中のP u - 2 3 9の割合が3%未満になるとボイド係数が正になるので、そのP u - 2 3 9の割合は3%以上にしなければならない。全P u中のP u - 2 4 0の割合が45%を超えるとボイド係数が正になるので、そのP u - 2 4 0の割合は45%以下にしなければならない。また、全P u中のP u - 2 4 0の割合が35%未満になると、除熱能力が低下するので、B W Rが保有する発電能力を十分に活用することができなくなる。したがって、そのP u - 2 4 0の割合は35%以上に必要がある。

## 【 0 0 3 2 】

以下、本発明の実施例を、図面を用いて詳細に説明する。

## 【 実施例 1 】

## 【 0 0 3 3 】

本発明の好適な一実施例である実施例1の軽水炉を、図1、図5～図11及び表1を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、電気出力1350MW用の炉心を備え

## 【 0 0 3 4 】

10

20

30

【表 1】

表 1

核種	組成(wt%)
Np-237	0.5
Pu-238	3.0
Pu-239	44.0
Pu-240	36.1
Pu-241	5.0
Pu-242	4.9
Am-241	3.7
Am-242M	0.1
Am-243	1.3
Cm-244	1.0
Cm-245	0.3
Cm-246	0.1

10

20

ているが、出力規模はこれに限定されるものではない。炉心に装荷された燃料集合体の体数を変更することによって、本実施例が適用できる他の出力規模の軽水炉を実現することができる。

## 【0035】

本実施例の軽水炉である電気出力1350MW用のBWRの概要を、図5に基づいて説明する。BWR19は、原子炉压力容器27内に、炉心20、気水分離器21、蒸気乾燥器22を配置している。炉心20は、パuffers型炉心であり、原子炉压力容器27内で炉心シュラウド25によって取囲まれている。気水分離器21は炉心20の上方に配置され、蒸気乾燥器22は気水分離器21の上方に配置される。複数のインターナルポンプ26が原子炉压力容器27の底部に設置され、インターナルポンプ26のインペラが原子炉压力容器27と炉心シュラウド25との間に形成されるダウンコマ内に配置される。主蒸気配管23及び給水配管24が原子炉压力容器27に接続される。炉心20には、図6に示すように、720体の燃料集合体1が装荷されている。3体の燃料集合体1に1本の割合でY字型の制御棒2が設けられ、223本の制御棒2が炉心20内に挿入可能に配置されている。それぞれの制御棒2は原子炉压力容器27の底部に設けられた別々の制御棒駆動装置29に連結されている。制御棒駆動装置29は、モータ駆動であり、軸方向における制御棒2の移動を微調整することができる。制御棒駆動装置29が、制御棒2の炉心20からの引き抜き、及び制御棒2の炉心20への挿入の各操作を実行する。中性子検出装置である複数の局所出力領域検出装置(LPRM)32が炉心20内に配置されている。これらのLPRM32は、平均出力領域モニタ(APRM)31に接続され、APRM31は制御棒駆動制御装置30に接続される。

30

40

## 【0036】

図7は燃料集合体格子の横断面を示している。燃料集合体1は、六角形の筒であるチャンネルボックス4内に、直径10.1mmの271本の燃料棒3を正三角形格子に配置している。燃料集合体1の横断面の形状は六角形をしており、燃料棒3の相互間の間隙が1.3mmである。核燃料物質によって構成された複数の燃料ペレット(図示せず)が、軸

50

方向に並ぶように、燃料棒 3 の被覆管（図示せず）内に配置されている。最外層の燃料棒列には 9 本の燃料棒 3 が配置される。チャンネルボックス 4 内の単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 54 % である。Y 字型制御棒 2 は、中心に位置するタイロッドから外側に向かって伸びる 3 枚の翼を有する。各翼は、 $B_4C$  が充填された複数の中性子吸収棒を備えており、タイロッドの周囲に 120 度の間隔を持って配置される。制御棒 2 は、軽水より減速能が小さい物質である炭素で構成されたフォロア部を、炉心 20 に最初に挿入される挿入端部に設けている。

#### 【0037】

BWR 19 が運転されているとき、インターナルポンプ（冷却材供給装置）26 の回転によってダウンカマ内の冷却材が加圧されて炉心 20 に供給される。炉心 20 内に供給された冷却材は、各燃料集合体 1 内に導かれ、核分裂性物質の核分裂によって発生する熱で加熱されて一部が蒸気になる。気液二相流状態の冷却材は、炉心 20 から気水分離器 21 に導かれて蒸気が分離される。分離された蒸気は、蒸気乾燥器 22 によって水分がさらに除去される。水分が除去された蒸気は、主蒸気配管 23 を通ってタービン（図示せず）に供給され、タービンが回転される。タービンに連結された発電機（図示せず）が回転され、電力が発生する。タービンから排出された蒸気は、復水器（図示せず）で凝縮されて凝縮水となる。この凝縮水（給水）は、給水配管 24 を通って原子炉圧力容器 27 内に導かれる。気水分離器 22 で分離された液体の冷却材は、ダウンカマ内で上記の給水と混合され、再び、インターナルポンプ 26 で加圧される。

#### 【0038】

平衡炉心の状態にある炉心 20 内での燃料集合体 1 の配置を、図 8 を用いて説明する。炉内滞在期間が最も長い、運転サイクルが 4 サイクル目である燃料集合体 1D が、中性子インポートの低い炉心最外周領域に配置される。その内側に位置する炉心外側領域には、中性子無限増倍率が最も高い、炉内滞在期間が 1 サイクル目である燃料集合体 1A が装荷されており、炉心の半径方向における出力分布の平坦化を図っている。炉心内側領域には、炉内滞在期間が 2 ～ 4 サイクル目の各燃料集合体 1B, 1C, 1D がそれぞれ分散配置されている。このような分散配置によって、炉心内側領域における出力分布の平坦化を図っている。燃料集合体 1A, 1B, 1C, 1D は、それぞれ、図 7 及び後述の図 10 及び図 11 に示す燃料集合体 1 である。これらの燃料集合体の下部タイプレート（図示せず）は、炉心 20 の下端部に配置されている炉心支持板（図示せず）に設けられる複数の燃料支持金具（図示せず）に支持される。燃料集合体に冷却材を導く冷却材通路が燃料支持金具内に形成されており、燃料支持金具に設置されたオリフィス（図示せず）がその冷却材通路の入口部に配置される。炉心 20 は、半径方向において最外周領域 6 及びその内側に位置する内側領域 1 の二領域が形成される（図 9 参照）。燃料集合体 1 の出力が小さい最外周領域 2 に位置するオリフィスの口径は、内側領域 1 に位置するオリフィスの口径よりも小さくなっている。

#### 【0039】

燃料集合体 1 は、燃料有効長の部分に、その上端から下端に向かって、図 10 に示すように、上部ブランケット領域 5、上部燃料領域 6、内部ブランケット領域 7、下部燃料領域 8 及び下部ブランケット領域 9 の 5 つの領域を順次形成している。それぞれの領域の高さは、以下の通りである。上部ブランケット領域 5 の高さは 120 mm であり、上部燃料領域 6 の高さは 227 mm であり、内部ブランケット領域 7 の高さは 450 mm であり、下部燃料領域 8 の高さは 225 mm であり、下部ブランケット領域 9 の高さは 180 mm である。燃料集合体 1 が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 の全ての燃料棒 3 は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には TRU の重量を 100 としたときに劣化ウランを重量 172 の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性 Pu の富化度は 18 wt % である。各ブランケット領域にはその混合酸化物燃料が充填されていない。なお、各ブランケット領域には劣化ウランのかわりに、天然ウランや、使用済み燃料集合体から回収される減損ウランを用いてもよい。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 0 】

燃料集合体 1 は、図 1 1 に示す 5 種類の燃料棒 3 を含んでいる。これらの燃料棒 3 は燃料棒 3 A ~ 3 E である。燃料棒 3 A ~ 3 E は図 1 1 に示すように燃料集合体 1 内に配置される。燃料棒 3 A ~ 3 E のそれぞれの上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 にそれぞれ充填された混合酸化物燃料は、新燃料集合体の状態において、燃料棒 3 A で核分裂性 P u の富化度が 1 0 . 7 w t %、燃料棒 3 B でその富化度が 1 3 . 5 w t %、燃料棒 3 C でその富化度が 1 6 . 8 w t %、燃料棒 3 D でその富化度が 1 8 . 2 w t % 及び燃料棒 3 E でその富化度が 1 9 . 5 w t % となっている。それぞれの燃料棒 3 の各ブランケット領域には T R U が存在しないが、それぞれの燃料棒 3 の上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 の各混合酸化物燃料は表 1 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 は、新燃料集合体の状態

10

## 【 0 0 4 1 】

ある運転サイクルでの B W R 1 9 の運転を停止した後、平衡炉心である炉心 2 0 内に配置された燃料集合体 1 のうち、例えば、4 分の 1 の燃料集合体 1 が燃焼度ゼロの燃料集合体（新燃料集合体）1 と交換される。新燃料集合体 1 が炉心 2 0 に装荷された後、次の運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が開始される。この新燃料集合体 1 は、次の運転サイクルでは 1 サイクル目の燃料集合体となる。インターナルポンプ 2 6 が駆動され、上記したように冷却材が炉心 2 0 に供給される。炉心 2 0 に供給される冷却材の流量（炉心流量）はミニマム流量になっている。インターナルポンプ 2 6 の回転速度は炉心流量制御装置（冷却材流量制御装置）3 3 によって制御される。制御棒駆動制御装置 3 0 からの制御信号に基づいて制御棒駆動装置 2 9 が駆動され、制御棒 2 が炉心 2 0 から引き抜かれる。臨界状態になった B W R 1 9 の升温昇圧が終了した後、さらに制御棒 2 が引き抜かれることによって原子炉出力が上昇する。制御棒 2 の引き抜きによる原子炉出力の上昇が一旦停止される。

20

## 【 0 0 4 2 】

炉心流量制御装置 3 3 の記憶装置（図示せず）は、図 2 の特性を記憶している。オペレータは、入力装置（図示せず）から、上記の燃料交換時に炉心 2 0 に装荷された新燃料集合体 1 に含まれる全 T R U 中の P u - 2 3 9 の割合のデータ（割合情報という）、すなわち、4 4 w t % を入力する。炉心流量制御装置 3 3 は、入力された割合情報及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定する。割合情報である 4 4 w t % に対応する設定炉心流量は、図 2 に示す特性によれば、相対炉心流量 1 . 0 0 になる。炉心流量制御装置 3 3 は、インターナルポンプ 2 6 の回転速度を増加させ、炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。炉心流量制御装置 3 3 は、炉心流量が設定炉心流量になったとき、インターナルポンプ 2 6 の回転速度の増加を停止させ、炉心流量の増加を停止させる。これ以降、その運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が停止されるまで、炉心流量は、炉心流量制御装置 3 3 によって、その設定炉心流量に保持される。炉心流量が設定炉心流量まで増加されるのに伴って、原子炉出力も増加する。炉心流量の増加が停止された後、制御棒 2 の引き抜きが再開され、原子炉出力が設定出力である 1 0 0 % まで上昇される。その運転サイクルの終了時に制御棒 2 が炉心 2 0 内に挿入され、B W R 1 9 の運転が停止される。

30

40

## 【 0 0 4 3 】

B W R 1 9 が原子炉出力 1 0 0 % で運転されている場合での、炉心 2 0 の軸方向における出力分布及びボイド率分布を図 1 2 に示す。炉心の平均ボイド率は 6 7 % で、炉心出口の蒸気重量率は 4 1 w t % である。B W R 1 9 が設定出力で運転されているとき、各 L P R M 3 2 は核分裂で発生する中性子の検出によって検出信号を出力する。A P R M 3 1 は入力したこれらの検出信号を平均して原子炉出力を求め、この原子炉出力が制御棒駆動制御装置 3 0 に入力される。制御棒駆動制御装置 3 0 は、入力した原子炉出力が定格出力に

50

なるように、制御棒駆動装置 29 を操作して制御棒 2 を炉心 20 から引き抜く。このようにして、運転サイクルの期間中、原子炉出力が定格出力に保持される。

#### 【0044】

新燃料集合体 1 に含まれる全 T R U 中の P u - 239 の割合が 44 w t %、及び設定炉心流量、すなわち、相対炉心流量が 1.00 である本実施例において、T R U 同位元素の割合保持が実現できる理由を、図 1 に示すアクチニド核種の生成崩壊チェーンを用いて以下に具体的に説明する。

#### 【0045】

新燃料集合体 1 に含まれている表 1 に示された T R U の複数の同位元素のそれぞれの絶対量は、その新燃料集合体 1 が炉心 20 から使用済燃料集合体として取り出されるまでの炉内滞在期間（4 つの運転サイクル）の間で減少する。しかしながら、アクチニド核種の生成崩壊チェーンに示す核変換が生じるので、炉心 20 から使用済燃料集合体として取り出され、再度炉心に新燃料集合体として装荷されるときに燃料集合体 1 に含まれている T R U の各同位元素の割合は、上記の新燃料集合体 1 のその割合と実質的に同じになる。上記の T R U の代表的な同位元素として、表 1 に示された P u - 239、P u - 240、P u - 241 及び A m - 243 を例に挙げて説明する。新燃料集合体 1 の上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に含まれている P u - 239 の量はその新燃料集合体 1 が使用済燃料集合体として炉心 20 から取り出されたときには減少している。しながら、4 つの運転サイクルの期間中において、各ブランケット領域に存在する U - 238 が、中性子捕獲反応とそれに引き続く崩壊により P u - 239 に転換され、新たな P u - 239 が生成される。P u - 240 も、燃料集合体 1 が炉心 20 から取り出された時点で上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 において減少しているが、各ブランケット領域で U - 238 より新たに生成される。A m - 243 は、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する T R U の他の同位元素から新たに生成される割合と A m - 243 の中性子捕獲による減少割合が釣り合っている。P u - 241 は、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 での核分裂による減少量よりも、各ブランケット領域での生成量が多くなる。P u - 241 は、新燃料集合体の状態よりも使用済燃料集合体において約 20 % 重量増加する。しかしながら、P u - 241 は半減期 14.4 年と比較的短い半減期を持っているので、炉心 20 から使用済燃料集合体として取り出され、再度炉心に新燃料として装荷される間に崩壊により減少する。このため、使用済燃料集合体として取り出され、再度炉心に新燃料集合体として装荷されるときに燃料集合体に含まれた T R U の各同位元素の割合は、新燃料集合体 1 におけるそれらの同位元素の割合と実質的に同じになる。なお、運転サイクルでの B W R の運転終了時における、B W R 炉心内に存在する T R U の複数の同位元素の割合も、その運転サイクルでの B W R の運転が開始できる状態における、その B W R 炉心内に存在する T R U のそれらの同位元素の割合と実質的に同じになる。

#### 【0046】

本実施例によれば、炉心流量制御装置 33 によって、炉心流量が、新燃料集合体 1 における T R U 中の P u - 239 の割合である 44 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節される。この調節によって中性子エネルギースペクトルも調節され、上記したように、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に含まれる T R U の該当する同位元素の減少及び各ブランケット領域におけるその同位元素の生成により、さらに、各ブランケット領域でほとんど生成されない T R U の同位元素においては、この同位元素の消滅、及び上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に含まれる T R U の他の同位元素からの生成により、上記した T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、安全上の制約条件を守りながら、核不拡散抵抗性をより大きくすることができる。本実施例は、T R U 中の P u - 239 の割合が 44 w t % であるので、炉心 20 から取り出された燃料集合体 1 内の T R U の量を新燃料集合体 1 よりも増加させることができる。

#### 【0047】

具体的に説明すると、本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉圧



力容器 27 で A B W R と同じ電気出力 1 3 5 0 M W を発生させる B W R 1 9 において、上部及び下部ブランケット領域を除く上部及び下部燃料領域及び内部ブランケット領域を含む炉心部領域の取り出し燃焼度 4 5 G W d / t の、特許文献 1 に記載されている軽水炉増殖炉よりも高燃焼度化した炉心部領域の取り出し燃焼度 5 4 G W d / t 、上部及び下部ブランケット領域を含んだ炉心 2 0 の取り出し燃焼度 4 7 G W d / t を実現する。さらに、本実施例は、ボイド係数が  $-2 \times 10^{-6}$  k/k/%void、M C P R が 1 . 3 であって、T R U の各同位元素の割合を上記したように実質的に一定に保った状態で、増殖比 1 . 0 1 を実現することができる。

#### 【 0 0 4 8 】

本実施例は、原子炉出力が設定原子炉出力（例えば、定格出力）から低下したときの原子炉出力の制御は、炉心流量制御装置 3 3 ではなく、制御棒駆動制御装置 3 0 が制御棒駆動装置 2 9 を制御して制御棒 2 を操作する（挿入する）ことによって行われる。したがって、本実施例は、T R U 同位元素の割合保持の実現、及び原子炉出力の制御を両立させることができる。

#### 【 実施例 2 】

#### 【 0 0 4 9 】

本発明の他の実施例である実施例 2 の軽水炉を、図 1 3 及び図 1 4 、表 2 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 2 0 を図 1 3 に示す炉心

#### 【 0 0 5 0 】

#### 【 表 2 】

表 2

核種	組成(wt%)
Pu-238	1.0
Pu-239	48.6
Pu-240	39.7
Pu-241	6.0
Pu-242	4.4
Am-241	0.3

2 0 A に、燃料集合体 1 を図 1 4 に示す燃料集合体 1 H に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明し、実施例 1 と同じ構成の説明は省略する。炉心 2 0 A はパフエ型炉心である。

#### 【 0 0 5 1 】

炉心 2 0 A に配置される燃料集合体 1 H は、図 1 4 に示す寸法及び表 2 に示す T R U の組成を除いて実施例 1 で用いる燃料集合体 1 と同じ構成を有している。燃料集合体 1 H も、単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合が実施例 1 と同じ 5 4 % である。炉心 2 0 A は、平衡炉心の状態において図 1 3 に示すように、燃料集合体 1 A ~ 1 E を配置している。燃料集合体 1 E は、炉内滞在期間が最も長い、運転サイクルが 5 サイクル目の燃料集合体であり、炉心 2 0 A の炉心最外周領域に配置される。炉心最外周領域の内側に位置する炉心外側領域には 1 サイクル目の燃料集合体 1 A が配置され、炉心内側領域には 2 ~ 4 サイクル目の各燃料集合体 1 B , 1 C , 1 D がそれぞれ分散配置されている。なお、炉心最外周領域には 3 体の燃料集合体 1 D が配置される。このような燃料集合体の配置により、炉心 2 0 A の半径方向における出力分布の平坦化が図られている。本実施例で用いられる燃料集合体 1 A ~ 1 E は、それぞれ、燃料集合体 1 H である。T

R Uを再処理しマイナーアクチニドを取り除いたプルトニウム及びA m - 2 4 1、劣化ウランの混合酸化物燃料を用いることにより高燃焼度化を実現している。新燃料に含まれるA m - 2 4 1は、T R Uを再処理しマイナーアクチニドを取り除いたプルトニウムが新燃料として炉心20に装荷されるまでの間にプルトニウム中のP u - 2 4 1の崩壊により生成されたものである。

#### 【0052】

燃料集合体1Hは、燃料集合体1と同様に、燃料有効長の部分に5つの領域を形成している。図14に示すように、上部ブランケット領域5の高さは200mmであり、上部燃料領域6の高さは211mmであり、内部ブランケット領域7の高さは310mmであり、下部燃料領域8の高さは207mmであり、下部ブランケット領域9の高さは220mmである。燃料集合体1Hが燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体1Hの全ての燃料棒3は、3つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域6及び下部燃料領域8にはT R Uを再処理してマイナーアクチニドを取り除いたプルトニウム及び再処理後P u - 2 4 1の崩壊で生成したA m - 2 4 1の合計の重量を100としたときに劣化ウランを重量198の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性P uの富化度は18wt%である。各ブランケット領域にはその混合酸化物燃料が充填されていない。燃料集合体1Jも、実施例1と同様に、燃料棒3A~3Eを含んでいる。これらの燃料棒3A~3Eは燃料棒3である。上部燃料領域6及び下部燃料領域8に存在する各混合酸化物燃料は表2に示す組成を有している。燃料集合体1Hは、新燃料集合体の状態で、全P u及びA m - 2 4 1中のP u - 2 3 9の割合が48.6wt%、全P u及びA m - 2 4 1中のP u - 2 4 0の割合が39.7wt%である。

10

20

#### 【0053】

炉心流量制御装置33は、入力装置から入力された割合情報(全P u及びA m - 2 4 1中のP u - 2 3 9の割合が48.6wt%)及び図2と同様にT R Uを再処理しマイナーアクチニドを取り除いたP u及びA m - 2 4 1を新燃料集合体として用いた炉心において、新燃料集合体中の全P u及びA m - 2 4 1中のP u - 2 3 9の割合が異なる複数の炉心毎に全P u及びA m - 2 4 1同位元素の割合を保持できる炉心流量を求めて得られた特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定する。炉心流量制御装置33は、実施例1と同様に、インターナルポンプ26の回転速度を増加させ、炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。炉心流量制御装置33は、炉心流量が設定炉心流量になったとき、インターナルポンプ26の回転速度の増加を停止させる。これ以降、その運転サイクルでのB W R 19の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

30

#### 【0054】

本実施例も、炉心20Aに装荷される新燃料集合体1Hにおける全P u中のP u - 2 3 9の割合である48.6wt%によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例1と同様に、T R U同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつT R Uの多重リサイクルが可能になる。本実施例も、炉心20から取り出された燃料集合体1H内のT R Uの量を新燃料集合体1Hよりも増加させることができる。

40

#### 【0055】

具体的に説明すると、本実施例によれば、現行のA B W Rとほぼ同じ大きさの原子炉圧力容器27でA B W Rと同じ電気出力1350MWを発生させるB W R 19において、実施例1よりも高燃焼度化した炉心20Aの取り出し燃焼度51GWd/t、上部及び下部ブランケット領域を除いた炉心部領域での取り出し燃焼度68GWd/tを実現することができる。本実施例は、ボイド係数が $-3 \times 10^{-5}$  k/k/%void、M C P Rが1.3であって、P u及びA m - 2 4 1各同位元素の割合を実施例1で述べたように実質的に一定に保った状態で増殖比1.01を実現することができる。

#### 【実施例3】

#### 【0056】

本発明の他の実施例である実施例3の軽水炉を、図15~図17、表3を用いて以下に

50

詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 20 を図 16 に示す炉心 2  
【 0 0 5 7 】

【表 3】

表 3

核種	組成(wt%)
Np237	0.6
Pu238	3.3
Pu239	40.1
Pu240	37.1
Pu241	5.4
Pu242	6.0
Am241	3.7
Am242M	0.2
Am243	1.6
Cm244	1.4
Cm245	0.5
Cm246	0.2

10

20

30

0 B に、燃料集合体 1 を図 15 及び図 17 に示す燃料集合体 1 J に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明し、実施例 1 と同じ構成の説明は省略する。炉心 20 B はパフエ型炉心である。

【 0 0 5 8 】

炉心 20 B に配置される燃料集合体 1 J を、図 15 を用いて説明する。燃料集合体 1 J は、横断面が六角形をしており、チャンネルボックス 4 内に、直径 9.2 mm の 331 本の燃料棒 3 J を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 J の相互間の間隙が 1.1 mm である。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 53 % である。炉心 20 B は、平衡炉心の状態において図 16 に示すように、燃料集合体 1 A ~ 1 D を配置している。炉心 20 と同様に、炉内滞在期間が最も長い、運転サイクルが 4 サイクル目の燃料集合体 1 D は、炉心 20 B の炉心最外周領域に配置される。炉心最外周領域の内側に位置する炉心外側領域には 1 サイクル目の燃料集合体 1 A が配置され、炉心内側領域には 2 ~ 4 サイクル目の各燃料集合体 1 B, 1 C, 1 D がそれぞれ分散配置されている。炉心内側領域と炉心外側領域の間に、複数の燃料集合体 1 D が環状に配置された中間領域が存在する。炉心 20 B は半径方向における出力分布が平坦化されている。図 16 に示した燃料集合体 1 A ~ 1 E は、それぞれ、燃料集合体 1 J である。

40

【 0 0 5 9 】

燃料集合体 1 J は、燃料集合体 1 と同様に、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している（図 17 参照）。上部ブランケット領域 5 の高さは 90 mm であり、上部燃料領域 6 の高さは 241 mm であり、内部ブランケット領域 7 の高さは 560 mm であり、下部燃

50

料領域 8 の高さは 241 mm であり、下部ブランケット領域 9 の高さは 90 mm である。燃料集合体 1 J が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 J の全ての燃料棒 3 J は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には T R U の重量を 100 としたときに劣化ウランを重量 153 の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性 P u の富化度は 18 w t % である。各ブランケット領域にはその混合酸化物燃料が充填されていない。燃料集合体 1 J も、実施例 1 と同様に、燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでいる。これらの燃料棒 3 A ~ 3 E は燃料棒 3 J である。上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する各混合酸化物燃料は表 3 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 J は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 239 の割合が 40 . 1 w t % である。各ブランケット領域にはその混合酸化物燃料が充填されていない。

10

#### 【0060】

炉心流量制御装置 33 は、入力装置から入力された割合情報 (40 . 1 w t %) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定する。炉心流量制御装置 33 は、実施例 1 と同様に、インターナルポンプ 26 の回転速度を増加させ、炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。炉心流量制御装置 33 は、炉心流量が設定炉心流量になったとき、インターナルポンプ 26 の回転速度の増加を停止させる。これ以降、その運転サイクルでの B W R 19 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

#### 【0061】

本実施例も、炉心 20 B に装荷される新燃料集合体 1 J における T R U 中の P u - 239 の割合である 40 . 1 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例も、炉心 20 B から取り出された燃料集合体 1 J 内の T R U の量を新燃料集合体 1 J よりも増加させることができる。

20

#### 【0062】

具体的に説明すると、本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉圧力容器で、A B W R と同じ電気出力 1350 MW を発生させる B W R 19 において、炉心 20 B の取出燃焼度 53 G W d / t を達成することができ、 $-3 \times 10^{-6}$  k/k/%void のボイド係数も実現することができる。本実施例は、M C P R が 1 . 3 あり、上記したように T R U 同位元素の割合保持を実現できて増殖比 1 . 01 を実現することができる。

30

#### 【実施例 4】

#### 【0063】

本発明の他の実施例である実施例 4 の軽水炉を、図 18 ~ 図 20、表 4 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 20 を図 19 に示す炉心 2

#### 【0064】

【表 4】

表 4

核種	組成(wt%)
Np237	0.2
Pu238	5.1
Pu239	14.4
Pu240	40.2
Pu241	4.8
Pu242	20.5
Am241	4.7
Am242M	0.2
Am243	4.0
Cm244	3.6
Cm245	1.1
Cm246	0.8
Cm247	0.2
Cm248	0.2

10

20

0 C に、燃料集合体 1 を図 1 8 及び図 2 0 に示す燃料集合体 1 K に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明し、実施例 1 と同じ構成の説明は省略する。炉心 2 0 C もパフエ型炉心である。

30

## 【0 0 6 5】

炉心 2 0 C に配置される燃料集合体 1 K (図 1 8 参照) は、チャンネルボックス 4 内に、直径 7 . 7 mm の 3 3 1 本の燃料棒 3 K を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 K の相互間の間隙が 2 . 6 mm であり、最外層の燃料棒列には 1 0 本の燃料棒 3 K が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 3 6 % である。炉心 2 0 C は、平衡炉心の状態において図 1 9 に示すように、経験した運転サイクル数の異なる燃料集合体 1 A ~ 1 D を配置している。4 サイクル目の燃料集合体 1 D は、炉心最外周領域に配置される。炉心外側領域には 1 サイクル目の燃料集合体 1 A が配置され、炉心内側領域には 2 ~ 4 サイクル目の各燃料集合体 1 B , 1 C , 1 D がそれぞれ分散配置されている。炉心内側領域と炉心外側領域の間に、複数の燃料集合体 1 B が環状に配置された中間領域が存在する。このような炉心 2 0 C は半径方向における出力分布がより平坦化される。図 1 9 に示した燃料集合体 1 A ~ 1 E は、それぞれ、燃料集合体 1 K である。

40

## 【0 0 6 6】

燃料集合体 1 K は、燃料集合体 1 と同様に、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している (図 2 0 参照)。上部ブランク領域 5 の高さは 3 0 mm であり、上部燃料領域 6 の高さは 1 9 4 mm であり、内部ブランク領域 7 の高さは 5 6 0 mm であり、下部燃料領域 8 の高さは 1 9 4 mm であり、下部ブランク領域 9 の高さは 3 0 mm である。燃料集合体 1 K が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 K の全ての燃料棒

50

3 K は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には T R U の重量を 1 0 0 としたときに劣化ウランを重量 7 の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性 P u の富化度は 1 8 w t % である。各ブランケット領域にはその混合酸化物燃料が充填されていない。燃料集合体 1 K も、燃料棒 3 K である燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでいる。上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する各混合酸化物燃料は表 4 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 K は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 2 3 9 の割合が 1 4 . 4 w t % である。

【 0 0 6 7 】

炉心流量制御装置 3 3 は、実施例 1 と同様に、割合情報 ( 1 4 . 4 w t % ) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定する。炉心流量制御装置 3 3 は、インターナルポンプ 2 6 を制御し、炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。炉心流量が設定炉心流量になったとき、インターナルポンプ 2 6 の回転が停止される。これ以降、その運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

10

【 0 0 6 8 】

本実施例も、炉心 2 0 C に装荷される新燃料集合体 1 K における T R U 中の P u - 2 3 9 の割合である 1 4 . 4 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心 2 0 C から取り出された燃料集合体 1 K 内の T R U の量を新燃料集合体 1 K よりも減少させることができる。

20

【 0 0 6 9 】

具体的に説明すると、本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉圧力容器で、A B W R と同じ電気出力 1 3 5 0 M W を発生させる B W R 1 9 において、炉心 2 0 C の取り出し燃焼度 6 5 G W d / t を達成できる。本実施例は、T R U の燃焼効率が 4 4 % で、ボイド係数が  $- 2 \times 10^{-4}$  k/k/%void で、M C P R が 1 . 3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

【 実施例 5 】

【 0 0 7 0 】

本発明の他の実施例である実施例 5 の軽水炉を、図 2 1、図 2 2、表 5 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 4 において炉心 2 0 C に配置する燃料集合

30

【 0 0 7 1 】

【表 5】

表 5

核種	組成(wt%)
Np237	0.2
Pu238	5.2
Pu239	8.5
Pu240	38.9
Pu241	4.8
Pu242	25.4
Am241	4.3
Am242M	0.2
Am243	4.7
Cm244	4.8
Cm245	1.4
Cm246	1.2
Cm247	0.2
Cm248	0.2

10

20

体 1 K を図 2 1、図 2 2 に示す燃料集合体 1 L に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 4 と同じである。本実施例の構成は、実施例 4 と異なる部分について説明する。本実施例で用いられる炉心もパuffers型炉心である。

30

## 【0072】

燃料集合体 1 L の構成を、図 2 1 及び図 2 2 を用いて説明する。燃料集合体 1 L は、チャンネルボックス 4 内に、直径 7 . 4 mm の 3 3 1 本の燃料棒 3 K を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 K の相互間の間隙が 2 . 9 mm であり、最外層の燃料棒列には 1 0 本の燃料棒 3 K が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 3 1 % である。本実施例における炉心の半径方向における燃料集合体 1 L の配置は図 1 9 に示す配置と同じである。

## 【0073】

40

燃料集合体 1 L は、燃料集合体 1 K と同様に、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している（図 2 2 参照）。上部ブランケット領域 5 の高さは 2 0 mm であり、上部燃料領域 6 の高さは 2 3 7 mm であり、内部ブランケット領域 7 の高さは 5 6 0 mm であり、下部燃料領域 8 の高さは 2 3 7 mm であり、下部ブランケット領域 9 の高さは 2 0 mm である。燃料集合体 1 L が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 L の全ての燃料棒 3 L は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に、TRU 酸化物燃料を充填している。この TRU 燃料の核分裂性 Pu の富化度は 1 3 . 3 wt % である。上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には TRU 及び劣化ウランの混合酸化物燃料を充填していない。各ブランケット領域は TRU 酸化物燃料を含んでいない。燃料集合体 1 L も燃料棒 3 L である燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでおり、上部燃料領域 6

50

及び下部燃料領域 8 に存在する各 T R U 燃料は表 5 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 L は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 2 3 9 の割合が 8 . 5 w t % である。

【 0 0 7 4 】

炉心流量制御装置 3 3 は、割合情報 ( 8 . 5 w t % ) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定する。炉心流量制御装置 3 3 は、インターナルポンプ 2 6 を制御し、炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。炉心流量が設定炉心流量になったとき、インターナルポンプ 2 6 の回転が停止される。これ以降、その運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

【 0 0 7 5 】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 L における T R U 中の P u - 2 3 9 の割合である 8 . 5 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体 1 L 内の T R U の量を新燃料集合体 1 L よりも減少させることができる。

【 0 0 7 6 】

具体的に説明すると、本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉圧力容器で、A B W R と同じ電気出力 1 3 5 0 M W を発生させる B W R 1 9 において、炉心の取り出し燃焼度 6 5 G W d / t を実現できる。本実施例は、T R U の燃焼効率が 5 5 % 、ボイド係数が  $- 3 \times 10^{-5}$  k/k/%void、M C P R が 1 . 3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

【 実施例 6 】

【 0 0 7 7 】

本発明の他の実施例である実施例 6 の軽水炉を、図 2 3 ~ 図 2 5 、表 6 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 2 0 を図 2 4 に示す炉心 2

【 0 0 7 8 】

10

20



【表 6】

表 6

核種	組成(wt%)
Np237	0.2
Pu238	4.2
Pu239	4.0
Pu240	37.7
Pu241	3.4
Pu242	33.0
Am241	4.3
Am242M	0.2
Am243	5.7
Cm244	4.4
Cm245	1.3
Cm246	1.1
Cm247	0.2
Cm248	0.3

10

20

0 D に、燃料集合体 1 を図 2 3 及び図 2 5 に示す燃料集合体 1 M に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明する。本実施例の軽水炉は電気出力が 4 5 0 M W であり、炉心 2 0 D は一領域炉心である。

30

## 【 0 0 7 9 】

炉心 2 0 D に配置される燃料集合体 1 M (図 2 3 参照) は、チャンネルボックス 4 内に、直径 8 . 7 m m の 3 3 1 本の燃料棒 3 M を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 M の相互間の間隙が 1 . 6 m m であり、最外層の燃料棒列には 1 0 本の燃料棒 3 M が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 4 6 % である。炉心 2 0 D における平衡炉心の状態を図 2 4 に示す。4 サイクル目の燃料集合体 1 D は、炉心最外周領域に配置される。炉心外側領域には 1 サイクル目の燃料集合体 1 A が配置され、炉心内側領域には 2 ~ 4 サイクル目の各燃料集合体 1 B , 1 C , 1 D がそれぞれ分散配置されている。炉心内側領域と炉心外側領域の間に、複数の燃料集合体 1 B が環状に配置された中間領域が存在する。このような炉心 2 0 D は半径方向における出力分布がより平坦化される。図 2 4 に示した燃料集合体 1 A ~ 1 E は、それぞれ、燃料集合体 1 M である。

40

## 【 0 0 8 0 】

燃料集合体 1 M は、燃料有効長の部分に 3 つの領域を形成している (図 2 5 参照)。上部ブランケット領域 5 の高さは 2 0 m m で、下部ブランケット領域 9 の高さは 2 0 m m で、これらのブランケット領域の間に形成された燃料領域 1 5 の高さは 2 0 1 m m である。燃料集合体 1 M は、燃焼度ゼロの新燃料集合体状態のとき、全ての燃料棒 3 M の 2 つのブ

50

ランケット領域に劣化ウランを充填し、それらの燃料領域 15 に T R U 酸化物燃料を充填している。この T R U 酸化物燃料の核分裂性 P u の富化度は 7 . 4 w t % である。各ランケット領域は T R U を含んでいない。燃料集合体 1 M も、燃料棒 3 M である燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでいる。燃料領域 15 に存在する T R U 酸化物燃料は表 6 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 M は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 239 の割合が 4 . 0 w t % である。

【 0 0 8 1 】

炉心流量制御装置 33 は、割合情報 ( 4 . 0 w t % ) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定する。炉心流量制御装置 33 は、インターナルポンプ 26 を制御し、炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。炉心流量が設定炉心流量になったとき、インターナルポンプ 26 の回転が停止される。これ以降、その運転サイクルでの B W R 19 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

10

【 0 0 8 2 】

本実施例も、炉心 20 C に装荷される新燃料集合体 1 K における T R U 中の P u - 239 の割合である 4 . 0 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心 20 D から取り出された燃料集合体 1 K 内の T R U の量を新燃料集合体 1 K よりも減少させることができる。

20

【 0 0 8 3 】

具体的に説明すると、本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉圧力容器で電気出力 450 MW を発生される B W R 19 において、炉心 20 D の取り出し燃焼度 75 G W d / t を達成できる。本実施例は、T R U の燃焼効率が 80 %、ボイド係数が  $-4 \times 10^{-5}$  k/k/%void、M C P R が 1 . 3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

【 実施例 7 】

【 0 0 8 4 】

本発明の他の実施例である実施例 7 の軽水炉を、図 26 ~ 図 29、表 7 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 20 を図 26、図 28 に示

30

【 0 0 8 5 】

【表 7】

表 7

核種	組成(wt%)
Np237	0.2
Pu238	5.4
Pu239	12.9
Pu240	40.5
Pu241	4.9
Pu242	20.9
Am241	4.8
Am242M	0.2
Am243	4.0
Cm244	3.8
Cm245	1.1
Cm246	0.9
Cm247	0.2
Cm248	0.2

10

20

す炉心 20E に、燃料集合体 1 を図 27 及び図 29 に示す燃料集合体 1N に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明する。本実施例の軽水炉の電気出力は実施例 1 より低い 830 MW であり、炉心 20E はパフエ型炉心である。

30

## 【0086】

炉心 20E に配置される横断面が正方形の燃料集合体 1N は、チャンネルボックス 4A 内に、直径 8.1 mm の 196 本の燃料棒 3N を正方格子に配置している。燃料棒 3N のピッチは 9.4 mm であり、燃料棒 1N には 10 本の燃料棒 3M が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 41% である。炉心 20E は、炉心 20E 内に 872 体が配置され、4 体の燃料集合体 1N に一本の割合で十字型の制御棒 2A を備えている。図 27 のチャンネルボックス 4A 外側のギャップ領域の十字型制御棒 2A の挿入されない側には図示していないが、チャンネルボックス 4A 外側のギャップ領域の水を排除する機能を有する水排除板が炉心上部格子板からつり下げられている。炉心 20E における平衡炉心の状態を図 28 に示す。4 サイクル目の燃料集合体 1d 及び 5 サイクル目の燃料集合体 1e は、炉心最外周領域に配置される。炉心外側領域には 1 サイクル目の燃料集合体 1a が配置され、炉心内側領域には 2 ~ 4 サイクル目の各燃料集合体 1b, 1c, 1d がそれぞれ分散配置されている。炉心内側領域と炉心外側領域の間に、複数の燃料集合体 1b が環状に配置された中間領域が存在する。このような炉心 20E は半径方向における出力分布がより平坦化される。

40

## 【0087】

燃料集合体 1N は、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している（図 29 参照）。上

50

部ブランケット領域 5 の高さは 40 mm、上部燃料領域 6 の高さは 180 mm、内部ブランケット領域 7 の高さは 560 mm、下部燃料領域 8 の高さは 174 mm、下部ブランケット領域 9 の高さは 90 mm である。燃料集合体 1 N が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 N の全ての燃料棒 3 N は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に、TRU 酸化物燃料を充填している。この TRU 燃料の核分裂性 Pu の富化度は 17.8 wt % である。各ブランケット領域は TRU を含んでいない。上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する TRU 酸化物燃料は表 7 に示す組成の TRU を含んでいる。燃料集合体 1 N は、新燃料集合体の状態で、全 TRU 中の Pu - 239 の割合が 12.9 wt % である。

【0088】

10

炉心流量制御装置 33 は、割合情報 (12.9 wt %) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定する。炉心流量制御装置 33 は、インターナルポンプ 26 を制御し、炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。炉心流量が設定炉心流量になったとき、インターナルポンプ 26 の回転が停止される。これ以降、その運転サイクルでの BWR 19 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

【0089】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 N における TRU 中の Pu - 239 の割合である 12.9 wt % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、TRU 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ TRU の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体 1 N 内の TRU の量を新燃料集合体 1 N よりも減少させることができる。

20

【0090】

具体的に説明すると、本実施例によれば、電気出力 848 MW を発生できる現行の ABWR において、炉心 20E の取り出し燃焼度 45 GWd / t を実現できる。本実施例は、TRU の燃焼効率が 43%、ボイド係数が  $-2 \times 10^{-5}$  k/k/%void、MCPR が 1.3 であって、TRU 同位元素の割合保持を実現でき、TRU を減少させることができる。

【実施例 8】

【0091】

本発明の他の実施例である実施例 8 の軽水炉を、図 30 ~ 図 32、表 8 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 20 を図 31 に示す炉心 2

30

【0092】

【表 8】

表 8

核種	組成(wt%)
Np237	0.5
Pu238	4.2
Pu239	31.6
Pu240	38.7
Pu241	5.8
Pu242	8.9
Am241	4.2
Am242M	0.2
Am243	2.3
Cm244	2.3
Cm245	0.7
Cm246	0.4
Cm247	0.1
Cm248	0.1

10

20

30

0 F に、燃料集合体 1 を図 3 0 及び図 3 2 に示す燃料集合体 1 P に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明する。本実施例の軽水炉は電気出力が 1 3 5 0 MW であり、炉心 2 0 F はパuffers型炉心である。

#### 【 0 0 9 3 】

炉心 2 0 F に配置される燃料集合体 1 P は、チャンネルボックス 4 内に、直径 8 . 7 m m の 3 3 1 本の燃料棒 3 P を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 P の相互間の間隙が 1 . 6 m m であり、最外層の燃料棒列には 1 0 本の燃料棒 3 P が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 4 7 % である。炉心 2 0 F は、平衡炉心の状態において、4 サイクル目の燃料集合体 1 D が炉心最外周領域に配置され、炉心外側領域には 1 サイクル目の燃料集合体 1 A が配置される。炉心内側領域には 2 ~ 4 サイクル目の各燃料集合体 1 B , 1 C , 1 D がそれぞれ分散配置されている。炉心内側領域と炉心外側領域の間に、複数の燃料集合体 1 B が環状に配置された中間領域が存在する。このような炉心 2 0 F は半径方向における出力分布がより平坦化される。図 3 1 に示した燃料集合体 1 A ~ 1 E は、それぞれ、燃料集合体 1 P である。

40

#### 【 0 0 9 4 】

燃料集合体 1 P は、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している（図 3 2 参照）。上部ブランケット領域 5 の高さは 9 0 m m 、上部燃料領域 6 の高さは 2 4 0 m m 、内部ブランケット領域 7 の高さは 5 6 0 m m 、下部燃料領域 8 の高さは 2 4 0 m m 、下部ブランケ

50

ット領域 9 の高さは 90 mm である。燃料集合体 1 P が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 P の全ての燃料棒 3 P は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には T R U の重量を 100 としたときに劣化ウランを重量 108 の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性 P u の富化度は 18 w t % である。各ブランケット領域は T R U を含んでいない。燃料集合体 1 M も、燃料棒 3 M である燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでいる。混合酸化物燃料は表 8 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 P は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 239 の割合が 31.6 w t % である。

【0095】

炉心流量制御装置 33 は、割合情報 (31.6 w t %) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定し、インターナルポンプ 26 を制御して炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。その運転サイクルでの B W R 19 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

10

【0096】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 P における T R U 中の P u - 239 の割合である 31.6 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体 1 P 内の T R U の量を新燃料集合体 1 P よりも減少させることができる。

20

【0097】

本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉压力容器で A B W R と同じ電気出力 1350 MW を発生する B W R 19 において、炉心 20 F の炉心取出燃焼度を 57 G w d / t まで高めることができる。本実施例は、ボイド係数が  $-2 \times 10^{-5} \text{ k/k/\%v o i d}$ 、T R U の燃焼効率が 15 %、M C P R が 1.3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

【実施例 9】

【0098】

本発明の他の実施例である実施例 9 の軽水炉を、図 33 ~ 図 35、表 9 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 20 を図 34 に示す炉心 2

30

【0099】

【表 9】

表 9

核種	組成(wt%)
Np237	0.4
Pu238	4.6
Pu239	26.4
Pu240	39.9
Pu241	5.8
Pu242	11.2
Am241	4.4
Am242M	0.2
Am243	2.7
Cm244	2.8
Cm245	0.9
Cm246	0.5
Cm247	0.1
Cm248	0.1

10

20

30

0 G に、燃料集合体 1 を図 3 3 及び図 3 5 に示す燃料集合体 1 Q に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明する。炉心 2 0 G はパフエ型炉心である。

#### 【0 1 0 0】

炉心 2 0 G に配置される燃料集合体 1 Q は、チャンネルボックス 4 内に、直径 8 . 5 m m の 3 3 1 本の燃料棒 3 Q を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 Q の相互間の間隙が 1 . 8 m m であり、最外層の燃料棒列には 1 0 本の燃料棒 3 Q が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 4 5 % である。炉心 2 0 G は、平衡炉心の状態において。4 サイクル目の燃料集合体 1 D が炉心最外周領域に配置され、炉心外側領域には 1 サイクル目の燃料集合体 1 A が配置される。炉心内側領域には 2 ~ 4 サイクル目の各燃料集合体 1 B , 1 C , 1 D がそれぞれ分散配置されている。炉心内側領域と炉心外側領域の間に、複数の燃料集合体 1 B が環状に配置された中間領域が存在する。このような炉心 2 0 G は半径方向における出力分布がより平坦化される。図 3 4 に示した燃料集合体 1 A ~ 1 E は、それぞれ、燃料集合体 1 Q である。

40

#### 【0 1 0 1】

燃料集合体 1 Q は、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している（図 3 5 参照）。上部ブランケット領域 5 の高さは 9 0 m m 、上部燃料領域 6 の高さは 2 2 4 m m 、内部ブランケット領域 7 の高さは 5 6 0 m m 、下部燃料領域 8 の高さは 2 2 4 m m 、下部ブランケット領域 9 の高さは 9 0 m m である。燃料集合体 1 Q が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき

50

、その燃料集合体 1 Q の全ての燃料棒 3 Q は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には T R U の重量を 1 0 0 としたときに劣化ウランを重量 7 9 の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性 P u の富化度は 1 8 w t % である。各ブランケット領域は T R U を含んでいない。燃料集合体 1 Q も、燃料棒 3 Q である燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでいる。混合酸化物燃料は表 9 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 Q は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 2 3 9 の割合が 2 6 . 4 w t % である。

【 0 1 0 2 】

炉心流量制御装置 3 3 は、割合情報 ( 2 6 . 4 w t % ) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定し、インターナルポンプ 2 6 を制御して炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。その運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

10

【 0 1 0 3 】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 Q における T R U 中の P u - 2 3 9 の割合である 2 6 . 4 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体 1 Q 内の T R U の量を新燃料集合体 1 Q よりも減少させることができる。

【 0 1 0 4 】

20

本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉压力容器で A B W R と同じ電気出力 1 3 5 0 M W を発生する B W R 1 9 において、炉心 2 0 G の取出燃焼度を 5 8 G w d / t まで増大できる。本実施例は、ポイド係数が  $- 3 \times 10^{-5}$  k/k/%void、T R U の燃焼効率が 2 2 %、M C P R が 1 . 3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

【 実施例 1 0 】

【 0 1 0 5 】

本発明の他の実施例である実施例 1 0 の軽水炉を、図 3 6、図 3 7 及び表 1 0 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 9 において炉心 2 0 G に配置する燃

【 0 1 0 6 】

30



【表 1 0】

表 1 0

核種	組成(wt%)
Np237	0.3
Pu238	5.1
Pu239	19.7
Pu240	40.6
Pu241	5.3
Pu242	15.3
Am241	4.7
Am242M	0.2
Am243	3.4
Cm244	3.4
Cm245	1.1
Cm246	0.7
Cm247	0.1
Cm248	0.1

10

20

30

料集合体 1 Q を図 3 6、図 3 7 に示す燃料集合体 1 R に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 9 と同じである。本実施例の構成は、実施例 9 と異なる部分について説明する。本実施例で用いられる炉心もパフエ型炉心である。

## 【 0 1 0 7 】

図 3 6 及び図 3 7 に示すように、燃料集合体 1 R は、チャンネルボックス 4 内に、直径 8 . 1 mm の 3 3 1 本の燃料棒 3 R を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 R の相互間の間隙が 2 . 2 mm であり、最外層の燃料棒列には 1 0 本の燃料棒 3 R が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 4 0 % である。本実施例における炉心の半径方向における燃料集合体 1 R の配置は図 3 4 に示す配置と同じである。

40

## 【 0 1 0 8 】

燃料集合体 1 R は、燃料集合体 1 Q と同様に、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している（図 3 7 参照）。上部ブランケット領域 5 の高さは 4 0 mm、上部燃料領域 6 の高さは 2 1 2 mm、内部ブランケット領域 7 の高さは 5 6 0 mm、下部燃料領域 8 の高さは 2 1 2 mm、及び下部ブランケット領域 9 の高さは 4 0 mm である。燃料集合体 1 R が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 R の全ての燃料棒 3 R は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には T R U の重量を 1 0 0 としたときに劣化ウランを重量 3 9 の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性 P u の富化度は 1 8 w t % である。各ブランケット領域は T R U を含んでいない。燃料集合体 1 R も燃料棒 3 R である燃料棒 3 A ~ 3 E を

50

含んでおり、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する各混合酸化物燃料は表 10 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 R は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 2 3 9 の割合が 1 9 . 7 w t % である。

【 0 1 0 9 】

炉心流量制御装置 3 3 は、割合情報 ( 1 9 . 7 w t % ) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定し、インターナルポンプ 2 6 を制御して炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。その運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

【 0 1 1 0 】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 R における T R U 中の P u - 2 3 9 の割合である 1 9 . 7 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体 1 R 内の T R U の量を新燃料集合体 1 R よりも減少させることができる。

10

【 0 1 1 1 】

本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉圧力容器で A B W R と同じ電気出力 1 3 5 0 M W を発生する B W R 1 9 にいて、炉心の取出燃焼度を 5 9 G W d t に高めることができる。本実施例は、ボイド係数が  $-4 \times 10^{-5}$  k/k/%void、T R U の燃焼効率が 3 4 %、M C P R が 1 . 3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

20

【 実施例 1 1 】

【 0 1 1 2 】

本発明の他の実施例である実施例 1 1 の軽水炉を、図 3 8、図 3 9 及び表 1 1 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 4 において炉心 2 0 C に配置する燃

【 0 1 1 3 】

【表 1 1】

表 1 1

核種	組成(wt%)
Np237	0.2
Pu238	5.1
Pu239	12.9
Pu240	40.8
Pu241	4.7
Pu242	21.2
Am241	4.7
Am242M	0.2
Am243	4.1
Cm244	3.7
Cm245	1.1
Cm246	0.9
Cm247	0.2
Cm248	0.2

10

20

30

料集合体 1 K を図 3 8、図 3 9 に示す燃料集合体 1 S に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 4 と同じである。本実施例の構成は、実施例 4 と異なる部分について説明する。本実施例で用いられる炉心もパフエ型炉心である。

## 【0 1 1 4】

図 3 8 及び図 3 9 に示すように、燃料集合体 1 S は、チャンネルボックス 4 内に、直径 7 . 6 mm の 3 3 1 本の燃料棒 3 S を正三角形格子に配置している。燃料棒 3 S の相互間の間隙が 2 . 7 mm であり、最外層の燃料棒列には 1 0 本の燃料棒 3 S が配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 3 5 % である。本実施例における炉心の半径方向における燃料集合体 1 S の配置は図 1 9 に示す配置と同じである。

40

## 【0 1 1 5】

燃料集合体 1 S は、燃料集合体 1 K と同様に、燃料有効長の部分に 5 つの領域を形成している（図 3 9 参照）。上部ブランケット領域 5 の高さは 3 5 mm、上部燃料領域 6 の高さは 1 8 9 mm、内部ブランケット領域 7 の高さは 5 6 0 mm、下部燃料領域 8 の高さは 1 8 9 mm、及び下部ブランケット領域 9 の高さは 3 5 mm である。燃料集合体 1 S が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 S の全ての燃料棒 3 S は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に、TRU 酸化物燃料を充填している。この TRU 酸化物燃料の核分裂性 Pu の富化度は 1 8 w t % である。各ブランケット領域は TRU を含んでいない。燃料集合体 1 S も燃料棒 3 S である燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでおり、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する各 TRU 酸

50

化物燃料は表 10 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 S は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 239 の割合が 12.9 wt % である。

【0116】

炉心流量制御装置 33 は、割合情報 (12.9 wt %) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定し、インターナルポンプ 26 を制御して炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。その運転サイクルでの B W R 19 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

【0117】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 S における T R U 中の P u - 239 の割合である 12.9 wt % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体 1 S 内の T R U の量を新燃料集合体 1 S よりも減少させることができる。

10

【0118】

本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉压力容器で A B W R と同じ電気出力 1350 MW を発生する B W R 19 において、炉心の炉心取り出し燃焼度 65 G w d / t を実現することができる。本実施例は、T R U の燃焼効率が 47 %、ボイド係数が  $-3 \times 10^{-4}$  k/k/%void、M C P R が 1.3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

20

【実施例 12】

【0119】

本発明の他の実施例である実施例 12 の軽水炉を、図 40、図 41 及び表 12 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 4 において炉心 20 C に配置する燃

【0120】

【表 1 2】

表 1 2

核種	組成(wt%)
Np237	0.2
Pu238	5.2
Pu239	11.0
Pu240	40.5
Pu241	4.8
Pu242	22.6
Am241	4.6
Am242M	0.2
Am243	4.3
Cm244	4.1
Cm245	1.2
Cm246	0.9
Cm247	0.2
Cm248	0.2

10

20

30

料集合体 1 Kを図 3 8、図 3 9に示す燃料集合体 1 Tに替えた構成を有し、他の構成は、実施例 4と同じである。本実施例の構成は、実施例 4と異なる部分について説明する。本実施例で用いられる炉心もパツフェ型炉心である。

## 【0 1 2 1】

燃料集合体 1 Tは、チャンネルボックス 4内に、直径 7 . 5 mmの 3 3 1本の燃料棒 3 Tを正三角形格子に配置している。燃料棒 3 Tの相互間の間隙が 2 . 8 mmであり、最外層の燃料棒列には 1 0本の燃料棒 3 Tが配置される。単位燃料棒格子の横断面積に占める燃料ペレットの横断面積の割合は 3 4 %である。本実施例における炉心の半径方向における燃料集合体 1 Tの配置は図 1 9に示す配置と同じである。

40

## 【0 1 2 2】

燃料集合体 1 Tは、燃料集合体 1 Kと同様に、燃料有効長の部分に 5つの領域を形成している（図 4 1参照）。上部ブランケット領域 5の高さは 3 0 mm、上部燃料領域 6の高さは 2 0 4 mm、内部ブランケット領域 7の高さは 5 6 0 mm、下部燃料領域 8の高さは 2 0 4 mm、及び下部ブランケット領域 9の高さは 3 0 mmである。燃料集合体 1 Tが燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 Tの全ての燃料棒 3 Tは、3つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6及び下部燃料領域 8に、TRU酸化物燃料を充填している。このTRU酸化物燃料の核分裂性Puの富化度は 1 6 w t %である。各ブランケット領域はTRUを含んでいない。燃料集合体 1 Tも燃料棒 3 Tである燃

50

料棒 3 A ~ 3 E を含んでおり、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する各 T R U 酸化物燃料は表 1 2 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 T は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 2 3 9 の割合が 1 1 . 0 w t % である。

【 0 1 2 3 】

炉心流量制御装置 3 3 は、割合情報 ( 1 1 . 0 w t % ) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定し、インターナルポンプ 2 6 を制御して炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。その運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

【 0 1 2 4 】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 T における T R U 中の P u - 2 3 9 の割合である 1 1 . 0 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1 と同様に、T R U 同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつ T R U の多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体 1 T 内の T R U の量を新燃料集合体 1 T よりも減少させることができる。

10

【 0 1 2 5 】

本実施例によれば、現行の A B W R とほぼ同じ大きさの原子炉压力容器で A B W R と同じ電気出力 1 3 5 0 M W を発生する B W R 1 9 において、炉心の取り出し燃焼度 6 5 G w d / t を実現することができる。本実施例は、T R U の燃焼効率が 5 0 % 、ボイド係数が  $-2 \times 10^{-4}$  k / k / % void 、M C P R が 1 . 3 であって、T R U 同位元素の割合保持を実現でき、T R U を減少させることができる。

20

【実施例 1 3 】

【 0 1 2 6 】

本発明の他の実施例である実施例 1 3 の軽水炉を、図 4 2 及び表 1 を用いて以下に詳細に説明する。本実施例の軽水炉は、実施例 1 において炉心 2 0 に配置する燃料集合体 1 を図 4 2 に示す燃料集合体 1 U に替えた構成を有し、他の構成は、実施例 1 4 と同じである。本実施例の構成は、実施例 1 と異なる部分について説明する。本実施例で用いられる炉心もパフフェ型炉心である。

【 0 1 2 7 】

燃料集合体 1 U は、燃料集合体 1 の 5 つの領域を図 4 2 に示すように形成したものである。燃料集合体 1 U の他の構成は、燃料集合体 1 と同じである。燃料集合体 1 U において、上部ブランケット領域 5 の高さは 1 2 0 m m 、上部燃料領域 6 の高さは 2 2 6 m m 、内部ブランケット領域 7 の高さは 4 5 0 m m 、下部燃料領域 8 の高さは 2 2 4 m m 、及び下部ブランケット領域 9 の高さは 1 8 0 m m である。燃料集合体 1 S が燃焼度ゼロの新燃料集合体のとき、その燃料集合体 1 U の全ての燃料棒は、3 つのブランケット領域に劣化ウランを充填し、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 には T R U の重量を 1 0 0 としたときに劣化ウランを重量 1 7 2 の割合で混合した混合酸化物燃料を充填している。この混合酸化物燃料の核分裂性 P u の富化度は 1 8 w t % である。各ブランケット領域は T R U を含んでいない。燃料集合体 1 U も燃料棒 3 A ~ 3 E を含んでおり、上部燃料領域 6 及び下部燃料領域 8 に存在する各混合酸化物燃料は表 1 に示す組成の T R U を含んでいる。燃料集合体 1 U は、新燃料集合体の状態で、全 T R U 中の P u - 2 3 9 の割合が 4 4 w t % である。

30

40

【 0 1 2 8 】

炉心流量制御装置 3 3 は、割合情報 ( 4 4 w t % ) 及び図 2 に示す特性に基づいて定まる設定炉心流量を設定し、インターナルポンプ 2 6 を制御して炉心流量を設定炉心流量になるまで増加させる。その運転サイクルでの B W R 1 9 の運転が停止されるまで、炉心流量はその設定炉心流量に保持される。

【 0 1 2 9 】

本実施例も、炉心に装荷される新燃料集合体 1 U における T R U 中の P u - 2 3 9 の割合である 4 4 w t % によって定まる設定炉心流量になるように調節されるので、実施例 1

50

と同様に、TRU同位元素の割合保持を実現できる。したがって、本実施例は、燃焼度をより高めることができ、かつTRUの多重リサイクルが可能になる。本実施例は、炉心から取り出された燃料集合体1U内のTRUの量を新燃料集合体1USよりも減少させることができる。

#### 【0130】

本実施例によれば、現行のABWRとほぼ同じ大きさの原子炉压力容器でABWRと同じ電気出力1350MWを発生するBWR19において、上部及び下部ブランケット領域を除く上部及び下部燃料領域及び内部ブランケット領域を含む炉心部領域の取り出し燃焼度45Gwd/tの、特許文献1に記載されている軽水炉増殖炉よりも高燃焼度化した炉心部領域の取り出し燃焼度52Gwd/t、上部及び下部ブランケット領域を含んだ炉心の取り出し燃焼度45Gwd/tを実現することができる。本実施例は、MCPRが1.3、ボイド係数が $-2 \times 10^{-5}$  k/k/%voidになって実施例1より負の絶対値を大きくしつつ、TRU同位元素の割合保持を実現でき、増殖比1.01を実現できる。

10

#### 【符号の説明】

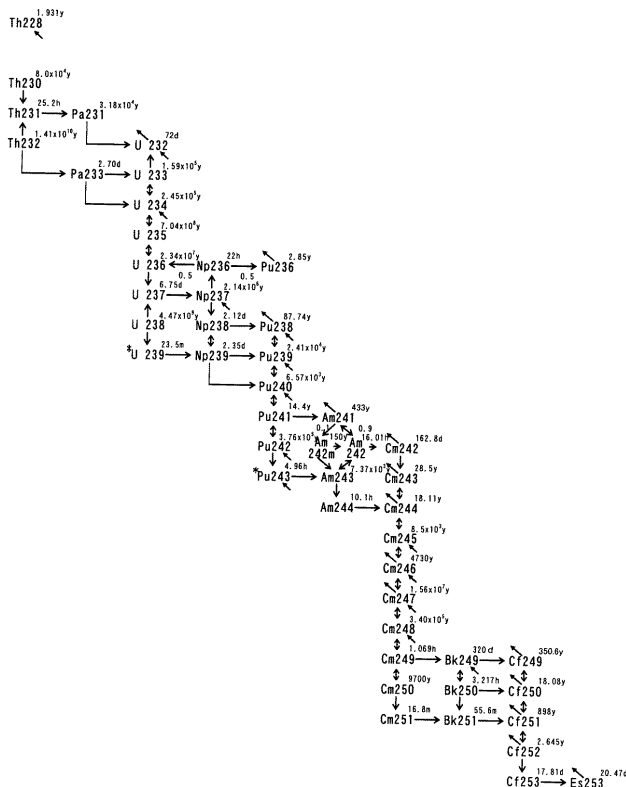
#### 【0131】

1, 1A~1E, 1H, 1J~1N, 1P~1U, 1a~1e...燃料集合体、2, 2A...制御棒、3, 3A, 3J~3N, 3P~3T...燃料棒、4, 4A...チャンネルボックス、5...上部ブランケット領域、6...上部燃料領域、7...内部ブランケット領域、8...下部燃料領域、9...下部ブランケット領域、19...BWR、20, 20A~20G...炉心、26...インターナルポンプ、30...制御棒駆動制御装置、33...炉心流量制御装置。

20

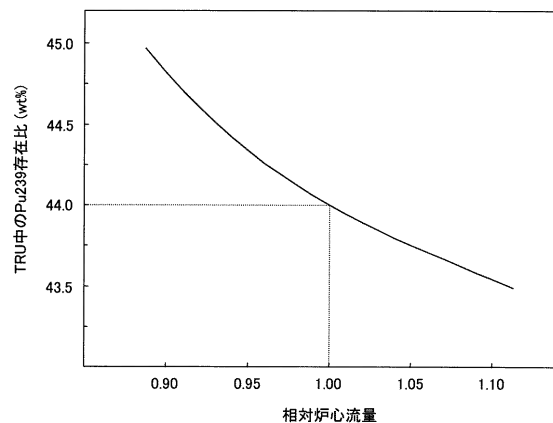
【図1】

図1



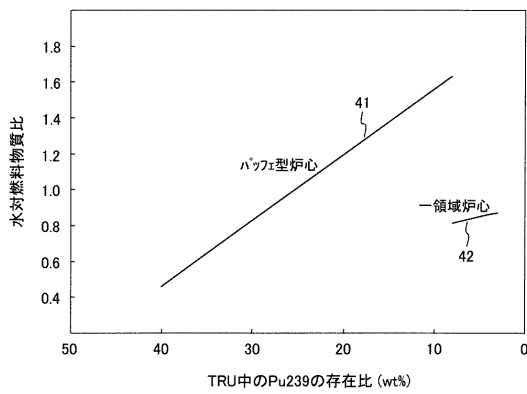
【図2】

図2



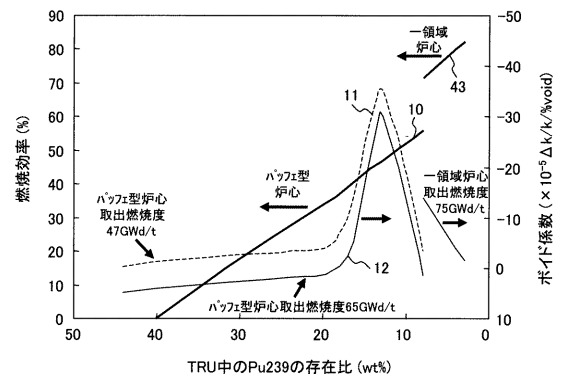
【図 3】

図 3



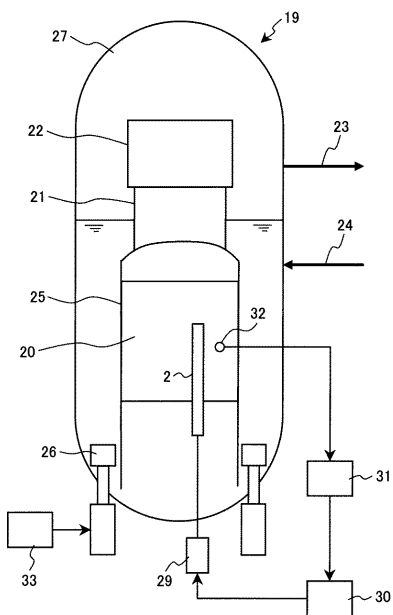
【図 4】

図 4



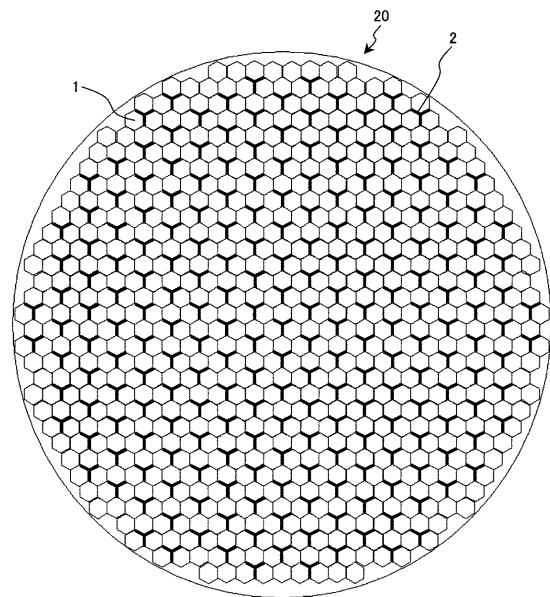
【図 5】

図 5



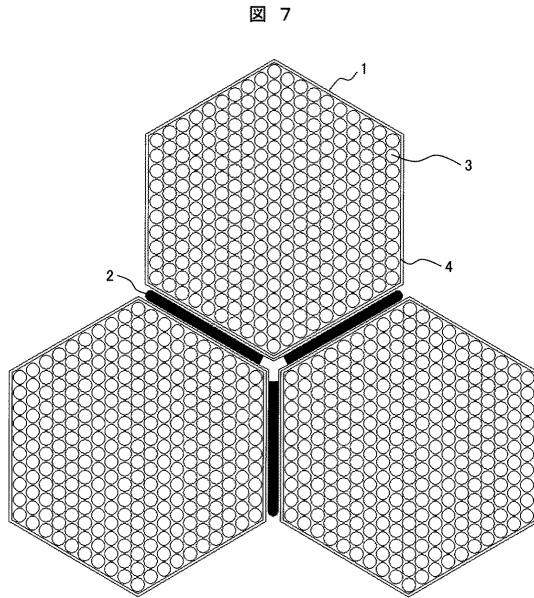
【図 6】

図 6

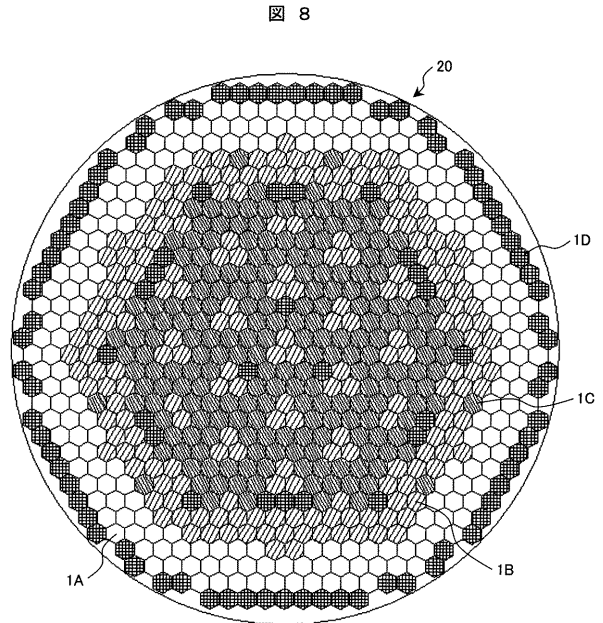




【図 7】

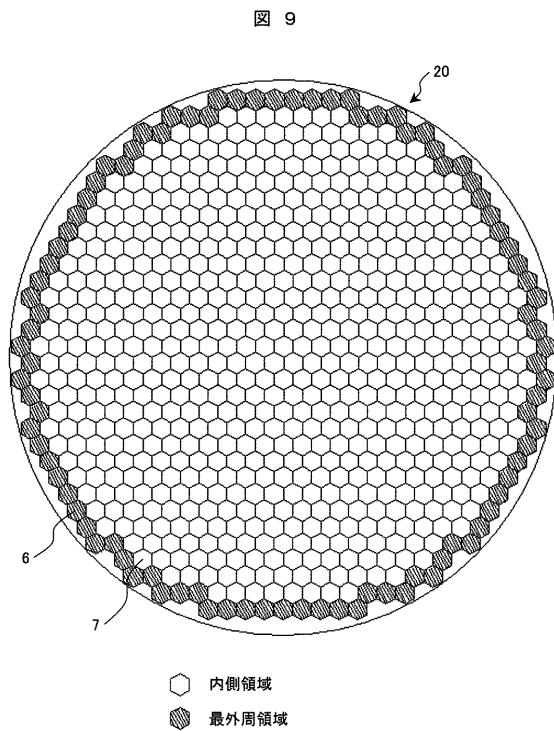


【図 8】

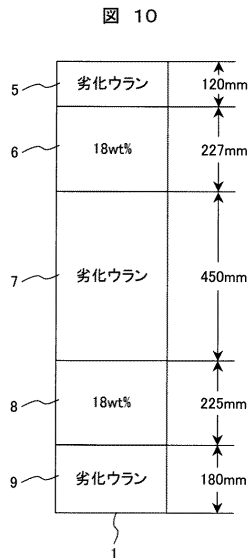


- 第1サイクル目の燃料集合体1A
- ▨ 第2サイクル目の燃料集合体1B
- ▩ 第3サイクル目の燃料集合体1C
- ▧ 第4サイクル目の燃料集合体1D

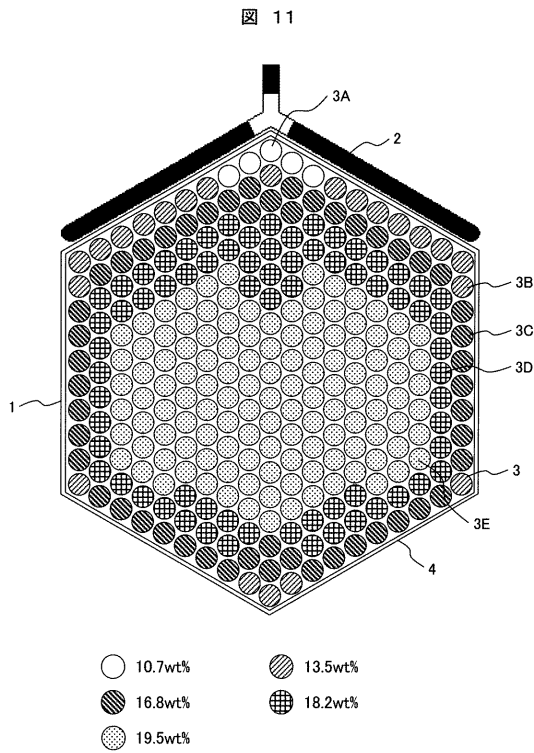
【図 9】



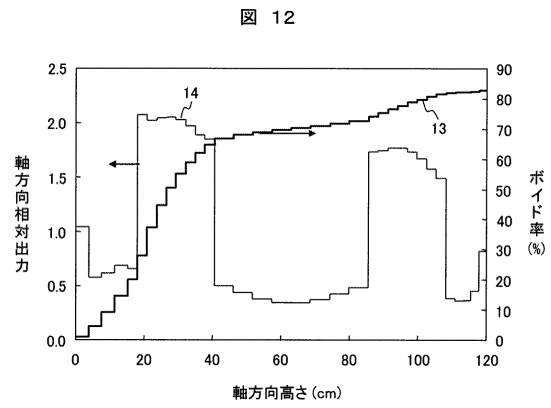
【図 10】



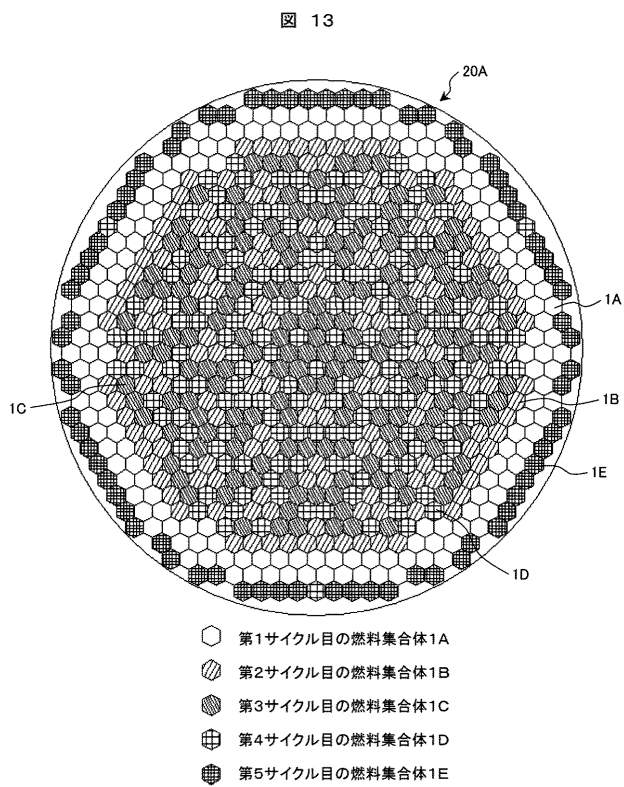
【図 1 1】



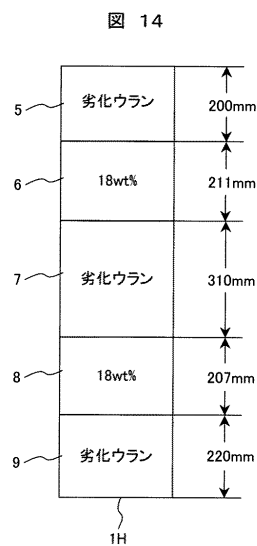
【図 1 2】



【図 1 3】

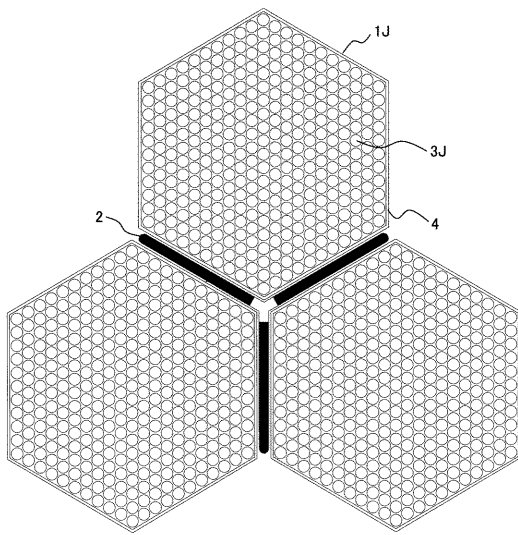


【図 1 4】



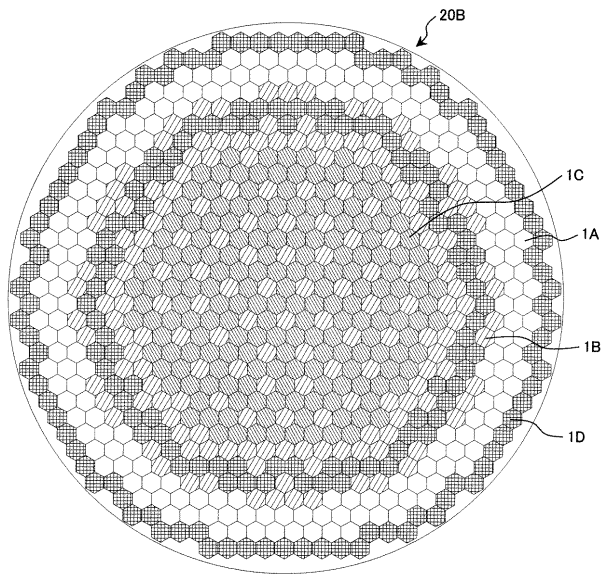
【図 15】

図 15



【図 16】

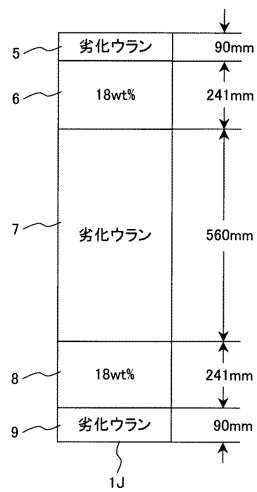
図 16



- 第1サイクル目の燃料集合体1A
- ▨ 第2サイクル目の燃料集合体1B
- ▩ 第3サイクル目の燃料集合体1C
- ▧ 第4サイクル目の燃料集合体1D

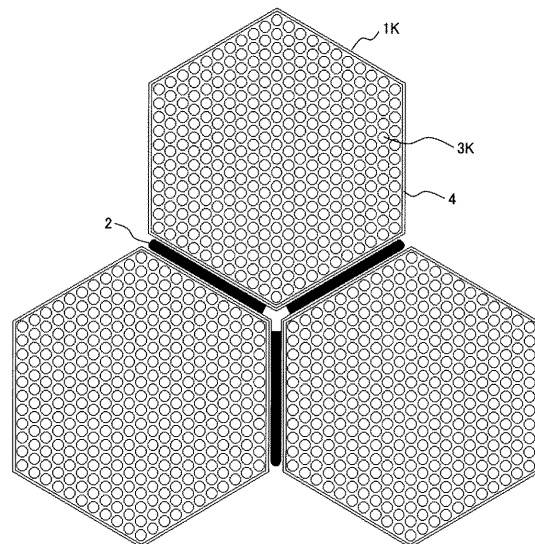
【図 17】

図 17



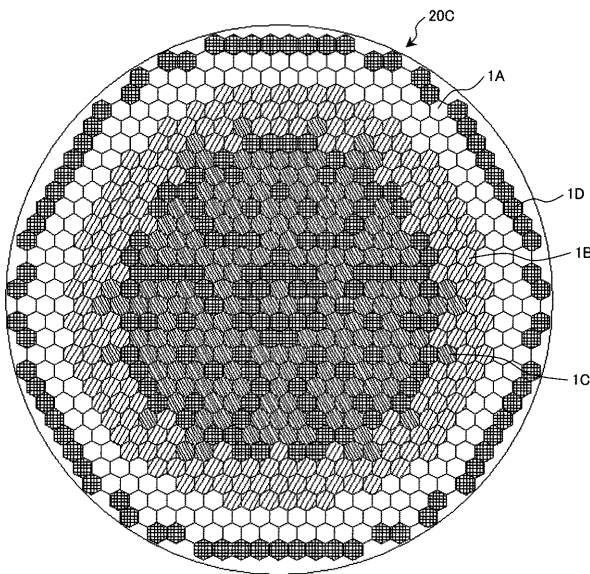
【図 18】

図 18



【図 19】

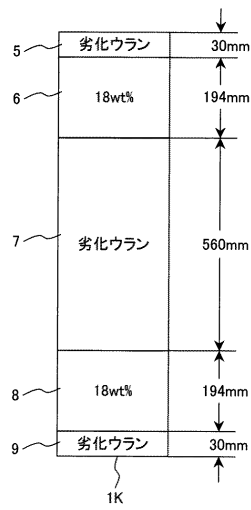
図 19



- 第1サイクル目の燃料集合体1A
- ▨ 第2サイクル目の燃料集合体1B
- ▩ 第3サイクル目の燃料集合体1C
- ▧ 第4サイクル目の燃料集合体1D

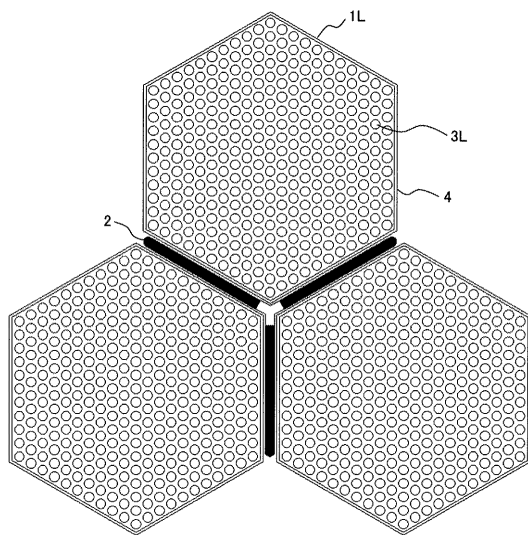
【図 20】

図 20



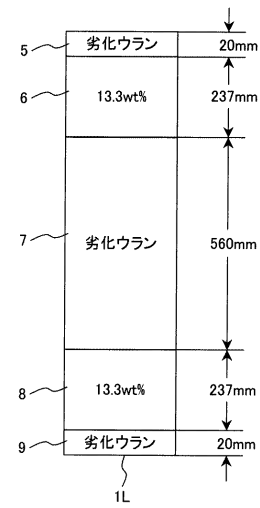
【図 21】

図 21



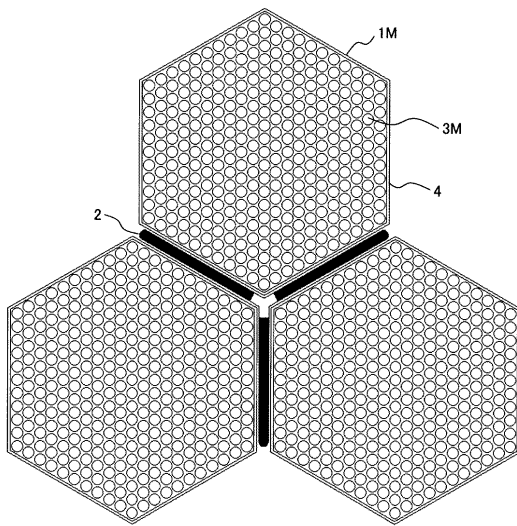
【図 22】

図 22



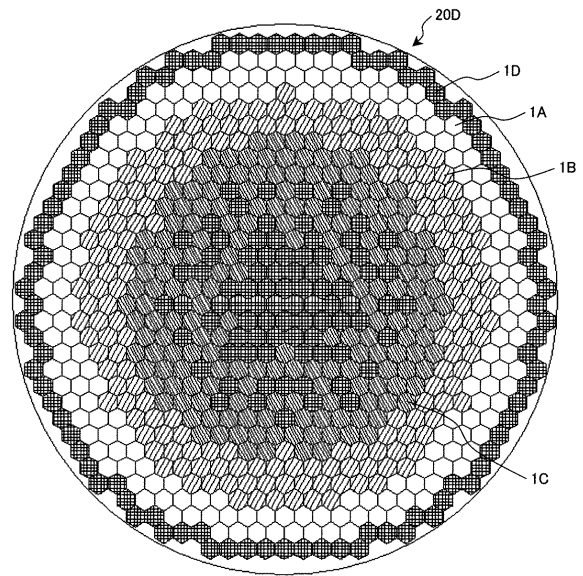
【図 23】

図 23



【図 24】

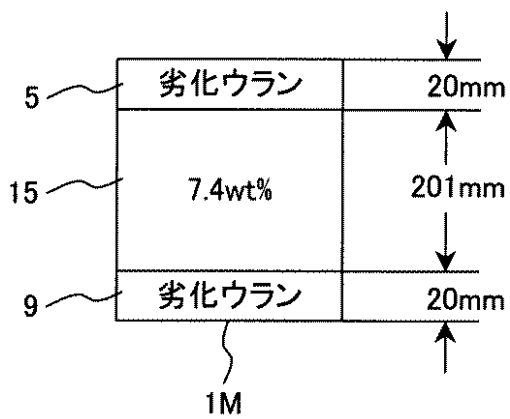
図 24



- 第1サイクル目の燃料集合体1A
- ▨ 第2サイクル目の燃料集合体1B
- ▩ 第3サイクル目の燃料集合体1C
- ▧ 第4サイクル目の燃料集合体1D

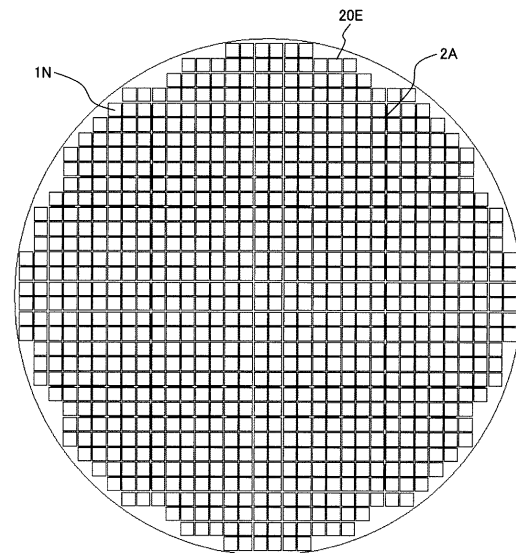
【図 25】

図 25



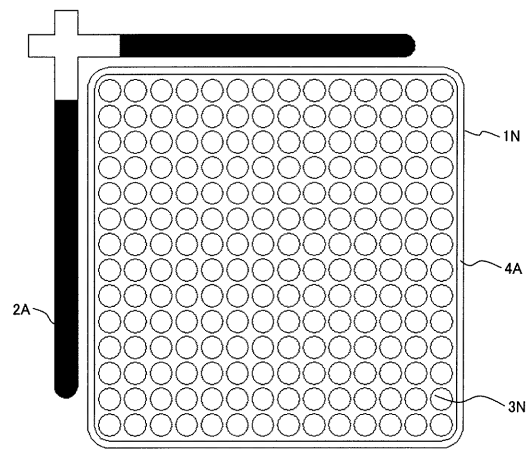
【図 26】

図 26



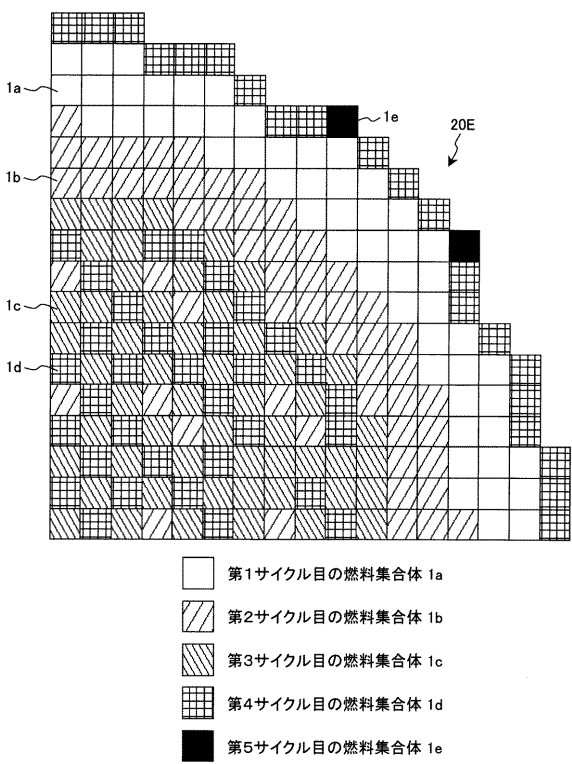
【 図 2 7 】

図 27



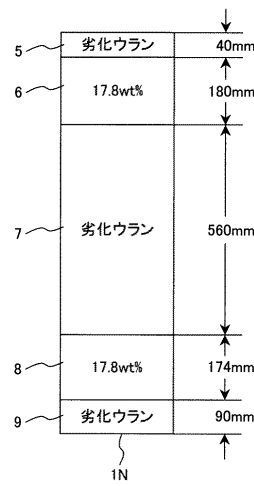
【 図 2 8 】

図 28



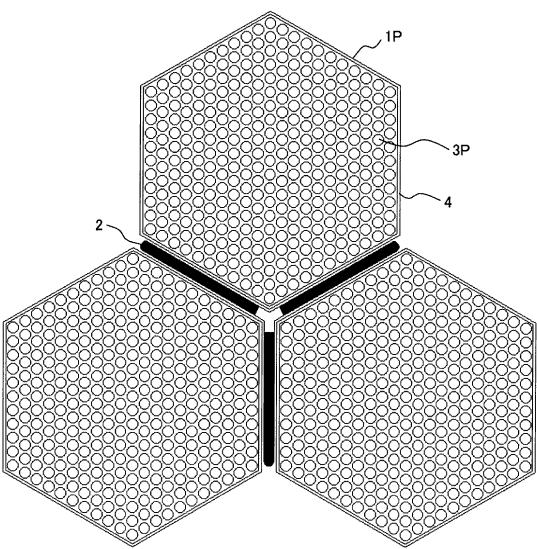
【 図 2 9 】

図 29



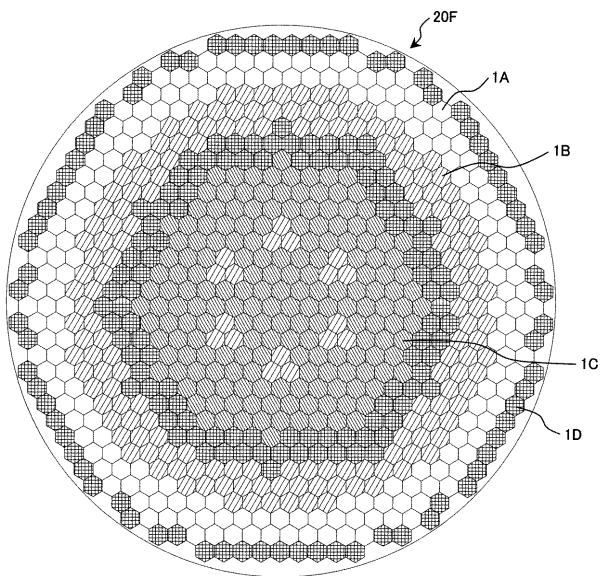
【 図 3 0 】

図 30



【図 3 1】

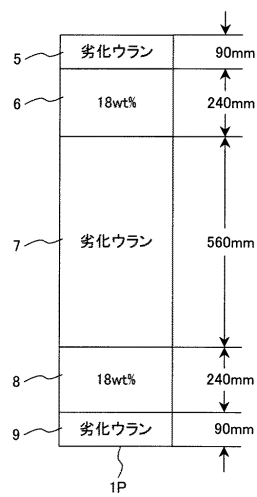
図 31



- 第1サイクル目の燃料集合体1A
- ▨ 第2サイクル目の燃料集合体1B
- ▩ 第3サイクル目の燃料集合体1C
- ▧ 第4サイクル目の燃料集合体1D

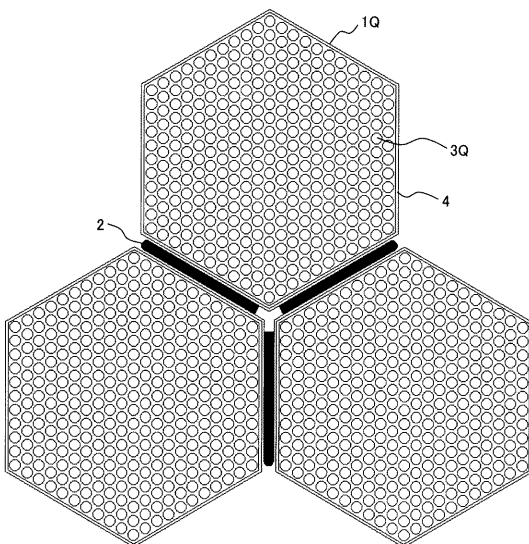
【図 3 2】

図 32



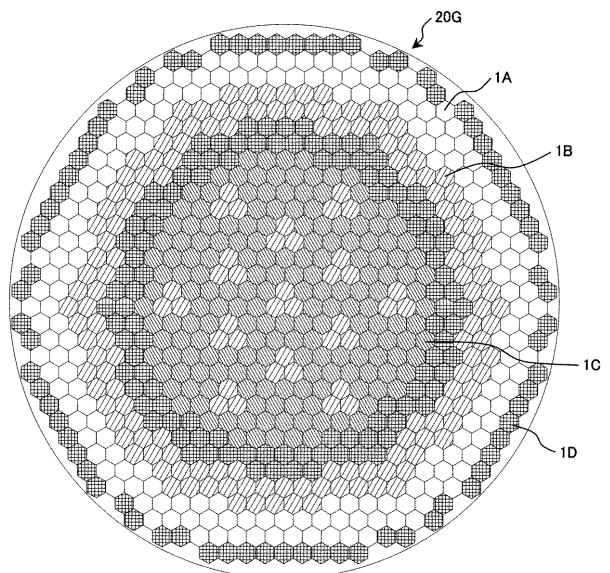
【図 3 3】

図 33



【図 3 4】

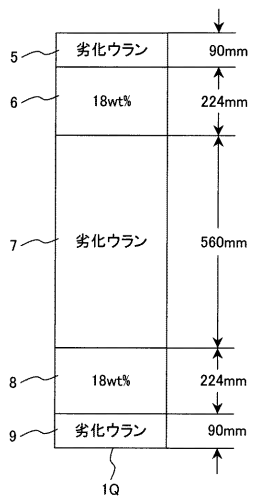
図 34



- 第1サイクル目の燃料集合体1A
- ▨ 第2サイクル目の燃料集合体1B
- ▩ 第3サイクル目の燃料集合体1C
- ▧ 第4サイクル目の燃料集合体1D

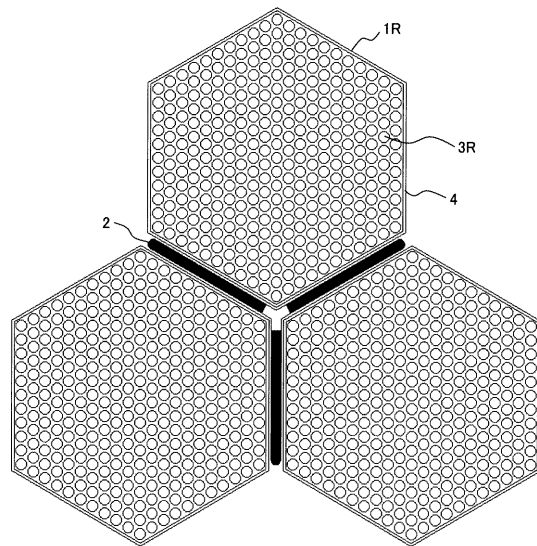
【図 35】

図 35



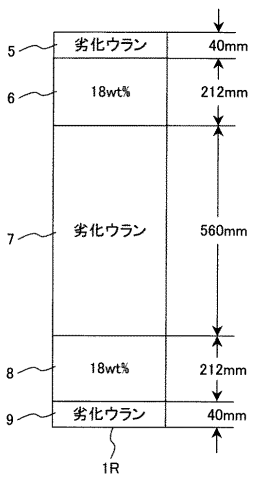
【図 36】

図 36



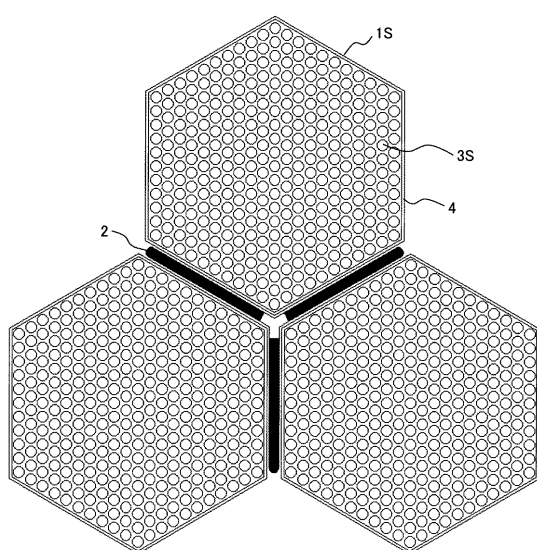
【図 37】

図 37



【図 38】

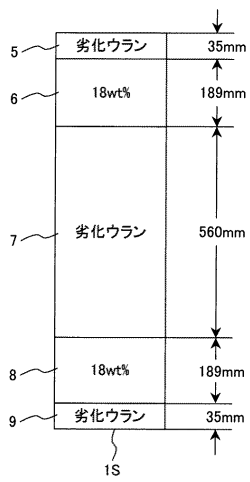
図 38





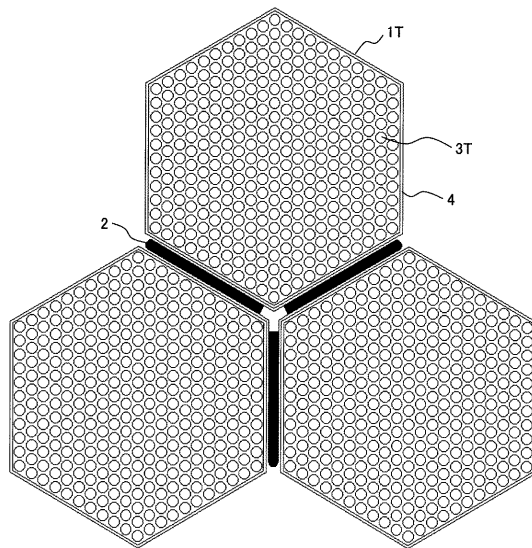
【図 39】

図 39



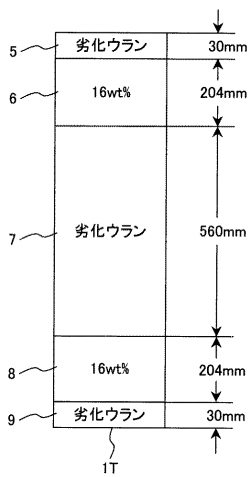
【図 40】

図 40



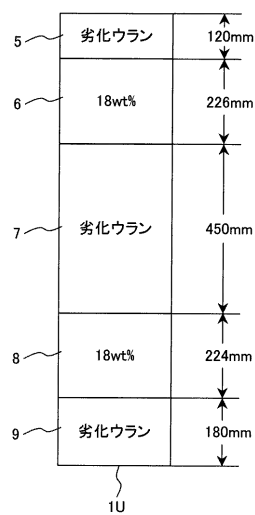
【図 41】

図 41



【図 42】

図 42



## 【手続補正書】

【提出日】平成21年11月18日(2009.11.18)

## 【手続補正 1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体は、この燃料集合体に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 45 % 以下の範囲にあることを特徴とする軽水炉の炉心。

## 【請求項 2】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む複数の燃料集合体が装荷されている軽水炉の炉心において、装荷された燃焼度ゼロの前記燃料集合体は、この燃料集合体に含まれる全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 50 % 以下の範囲にあり、かつ、全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-240$  の割合が 35 % 以上 45 % 以下の範囲にあることを特徴とする軽水炉の炉心。

## 【請求項 3】

前記炉心から取り出された前記燃料集合体内に存在する前記超ウラン核種の複数の同位元素の割合が前記炉心に装荷される燃焼度ゼロの前記燃料集合体内に存在する前記複数の同位元素の割合と実質的に同一になる請求項 1 または請求項 2 に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 4】

チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有する前記燃料集合体は、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が 30 % 以上 55 % 以下である請求項 1 ないし請求項 3 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 5】

上部ブランケット領域、上部燃料領域、内部ブランケット領域、下部燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に、上方より配置されている請求項 1 ないし請求項 4 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 6】

上部ブランケット領域、燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に上方より配置されている請求項 1 ないし請求項 4 のいずれか 1 項に記載の軽水炉の炉心。

## 【請求項 7】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃料物質に含まれる全ての前記超ウラン核種中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 45 % 以下の範囲にあることを特徴とする燃料集合体。

## 【請求項 8】

超ウラン核種の複数の同位元素を含む核燃料物質を有し、燃焼度ゼロのとき、前記核燃料物質に含まれる全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-239$  の割合が 3 % 以上 50 % 以下の範囲にあり、かつ、全ての  $Pu$  中に占める  $Pu-240$  の割合が 35 % 以上 45 % 以下の範囲にあることを特徴とする燃料集合体。

## 【請求項 9】

前記炉心から取り出されたときに前記核燃料物質に含まれる前記超ウラン核種の複数の同位元素の割合が前記炉心に装荷される燃焼度ゼロのときに前記核燃料物質に含まれる前記複数の同位元素の前記割合と実質的に同一になる請求項 7 または請求項 8 に記載の燃料集合体。

**【請求項 10】**

チャンネルボックス及びこのチャンネルボックス内に配置された複数の燃料棒を有し、前記チャンネルボックス内の単位燃料棒格子の横断面積に占める、前記燃料棒内の燃料ペレットの横断面積の割合が30%以上55%以下である請求項7ないし請求項9のいずれか1項に記載の燃料集合体。

**【請求項 11】**

上部ブランケット領域、上部燃料領域、内部ブランケット領域、下部燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に上方より燃料有効長の領域に配置されている請求項7ないし請求項10のいずれか1項に記載の燃料集合体。

**【請求項 12】**

上部ブランケット領域、燃料領域及び下部ブランケット領域が、軸方向において、この順に上方より燃料有効長の領域に配置されている請求項7ないし請求項10のいずれか1項に記載の燃料集合体。

**【請求項 13】**

燃焼度ゼロの状態では、各前記ブランケット領域は劣化ウランを含み前記超ウラン核種を含んでいなく、各前記燃料領域は前記同位元素を含む前記核燃料物質を含んでいる請求項11または請求項12に記載の燃料集合体。