

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6878251号
(P6878251)

(45) 発行日 令和3年5月26日(2021.5.26)

(24) 登録日 令和3年5月6日(2021.5.6)

(51) Int.Cl. F 1
G 2 1 C 3/326 (2006.01) G 2 1 C 3/326 4 0 0

請求項の数 12 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2017-217136 (P2017-217136)	(73) 特許権者	000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号
(22) 出願日	平成29年11月10日(2017.11.10)	(73) 特許権者	317015294 東芝エネルギーシステムズ株式会社 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34
(65) 公開番号	特開2018-128445 (P2018-128445A)	(74) 代理人	110001092 特許業務法人サクラ国際特許事務所
(43) 公開日	平成30年8月16日(2018.8.16)	(72) 発明者	和田 怜志 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
審査請求日	令和2年2月17日(2020.2.17)	(72) 発明者	松宮 浩志 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願2017-22319 (P2017-22319)		
(32) 優先日	平成29年2月9日(2017.2.9)		
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 軽水炉用燃料集合体、軽水炉炉心設計方法および軽水炉用燃料集合体設計方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

軽水炉用燃料集合体の設計方法であって、
 前記軽水炉用燃料集合体は複数の平行な燃料棒を有し、
 前記燃料棒は長手方向に垂直な方向に互いに間隔をあけて配列され、
 前記燃料棒は被覆管と前記被覆管内に封入されて少なくとも一部に濃縮ウランを含む二酸化ウランを主成分とした核燃料物質とを有し、
 前記核燃料物質のうち少なくとも一部は可燃性毒物を含むものであり、
 当該設計方法は、
 前記燃料集合体に含まれる燃料棒の本数を N (N は 2 以上の整数)、前記燃料棒のうち可燃性毒物を含む核燃料物質を封入した可燃性毒物入り燃料棒の本数を n (n は 1 以上かつ N より小さい整数)、前記 n 本の可燃性毒物入り燃料棒における核燃料物質のうちの可燃性毒物の濃度(質量%)を p 、前記燃料集合体の全本数にわたる平均ウラン 235 の濃縮度(質量%)を e とするとき、解析または実験によって、複数の $p \cdot n / N$ と e のそれぞれの組合せが炉心として成立するか否かを示す炉心判定データを蓄積する炉心判定データ蓄積ステップと、
 炉心判定データに基づいて、 $p \cdot n / N$ と e との組合せが炉心として成立するか否かを判定する判定式を決定する炉心判定式決定ステップと、
 前記判定式に基づき、仮に設定された前記燃料集合体の構成が炉心として成立するか否かを判定する炉心成否判定ステップを備え、

10

20

前記判定式は、正の定数 a_1 、 a_2 、 b および c (ただし、 $a_1 > a_2$) を用いて、炉心成立の条件を、

$$a_1 \cdot e^{-b} < p \cdot n / N < a_2 \cdot e^{-c}$$

とし、

前記 e は 5 % 以上であり、

前記定数 a_1 および a_2 を 0.57 とし、前記定数 b を 1.8 とし、前記定数 c を 0.8 とするものであることを特徴とする軽水炉用燃料集合体設計方法。

【請求項 2】

前記可燃性毒物を含む核燃料物質中のウラン 235 濃縮度は、前記燃料集合体に含まれる核燃料物質のウラン 235 濃縮度の最高値より低いこと、を特徴とする請求項 1 に記載の軽水炉用燃料集合体設計方法。

10

【請求項 3】

前記燃料集合体内では、前記燃料棒が正方格子状に配列されており、少なくとも 1 本の前記可燃性毒物入り燃料棒が、前記正方格子状の配列方向に対応する 4 面のうち少なくとも 1 面で他の燃料棒と隣接しないこと、を特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の軽水炉用燃料集合体設計方法。

【請求項 4】

前記燃料集合体内では、前記燃料棒が正方格子状に配列されており、少なくとも 1 本の前記可燃性毒物入り燃料棒が、前記正方格子状の燃料棒配列の配列方向に対応する 4 面のうち少なくとも 1 面で他の前記可燃性毒物入り燃料棒と隣接すること、を特徴とする請求項 1 ないし請求項 3 のいずれか一項に記載の軽水炉用燃料集合体設計方法。

20

【請求項 5】

前記核燃料物質に添加される可燃性毒物が、ガドリニウムを含む化合物もしくはエルビウムを含む化合物もしくはホウ素を含む化合物であること、を特徴とする請求項 1 ないし請求項 4 のいずれか一項に記載の軽水炉用燃料集合体設計方法。

【請求項 6】

前記核燃料物質に添加される可燃性毒物がガドリニアであって、その最高質量割合が 20 質量 % 未満であること、を特徴とする請求項 1 ないし請求項 5 のいずれか一項に記載の軽水炉用燃料集合体設計方法。

30

【請求項 7】

前記核燃料物質に添加される可燃性毒物がガドリニウムを含む化合物であって、奇数質量数のガドリニウムが天然ガドリニウムよりも濃縮されていること、を特徴とする請求項 1 ないし請求項 6 のいずれか一項に記載の軽水炉用燃料集合体設計方法。

【請求項 8】

軽水炉炉心の設計方法であって、前記軽水炉炉心は複数の燃料集合体を有し、前記燃料集合体は長手方向に垂直な方向に互いに集合体間隙を介して隣接して正方格子状に配列され、

前記集合体間隙内には複数の反応度制御装置が配置され、

前記軽水炉用燃料集合体は複数の平行な燃料棒を有し、

前記燃料棒は長手方向に垂直な方向に互いに間隔をあけて配列され、

前記燃料棒は被覆管と前記被覆管内に封入されて少なくとも一部に濃縮ウランを含む二酸化ウランを主成分とした核燃料物質とを有し、

前記核燃料物質のうち少なくとも一部は可燃性毒物を含むものであり、

当該設計方法は、前記複数の燃料集合体のうちの少なくとも一部の前記燃料集合体について、前記燃料集合体に含まれる燃料棒の本数を N (N は 2 以上の整数)、前記燃料棒のうち可燃性毒物を含む核燃料物質を封入した可燃性毒物入り燃料棒の本数を n (n は 1 以上かつ N より小さい整数)、前記 n 本の可燃性毒物入り燃料棒における核燃料物質のうちの可燃性毒物の濃度 (質量 %) を p 、前記燃料集合体の全本数にわたる平均ウラン 235

40

50

の濃縮度（質量％）を e とするとき、解析または実験によって、複数の $p \cdot n / N$ と e のそれぞれの組合せが炉心として成立するか否かを示す炉心判定データを蓄積する炉心判定データ蓄積ステップと、

炉心判定データに基づいて、 $p \cdot n / N$ と e との組合せが炉心として成立するか否かを判定する判定式を決定する炉心判定式決定ステップと、

前記判定式に基づき、仮に設定された前記燃料集合体の構成が炉心として成立するか否かを判定する炉心成否判定ステップを備え、

前記判定式は、正の定数 a_1 、 a_2 、 b および c （ただし、 $a_1 > a_2$ ）を用いて、炉心成立の条件を、

$$a_1 \cdot e - b < p \cdot n / N < a_2 \cdot e - c$$

とし、

前記 e は 5 % 以上であり、

前記定数 a_1 および a_2 を 0.57 とし、前記定数 b を 1.8 とし、前記定数 c を 0.8 とするものであることを特徴とする軽水炉炉心設計方法。

【請求項 9】

前記可燃性毒物入り燃料棒が、前記燃料集合体中で前記反応度制御装置と隣接しない位置に配置されること、を特徴とする請求項 8 に記載の軽水炉炉心設計方法。

【請求項 10】

前記軽水炉炉心は、核計装装置をさらに備え、前記核計装装置は前記反応度制御装置が配置される前記集合体間隙とは異なる前記集合体間隙内に配置され、

前記可燃性毒物入り燃料棒は前記核計装装置と隣接しない位置に配置されること、を特徴とする請求項 8 または請求項 9 に記載の軽水炉炉心設計方法。

【請求項 11】

前記複数の燃料集合体の一部の燃料集合体は、前記反応度制御装置に隣接して当該反応度制御装置を囲むコントロールセルを構成し、

前記炉心成否判定ステップは、前記コントロールセルを構成する前記燃料集合体で、仮に設定された前記燃料集合体の構成について、前記炉心判定式決定ステップで決定された判定式に基づいて、炉心の成否を判定すること、を特徴とする請求項 8 ないし請求項 10 のいずれか一項に記載の軽水炉炉心設計方法。

【請求項 12】

長手方向に互いに平行に延びる複数の燃料棒が長手方向に垂直な方向に互いに間隔をあけて平行に配列されて結束される軽水炉用燃料集合体であって、

前記複数の燃料棒はそれぞれが、

長手方向に延びる被覆管と、

前記被覆管内に封入されて少なくとも一部に濃縮ウランを含む二酸化ウランを主成分とした核燃料物質と、

を有するものであって、

前記核燃料物質のうち少なくとも一部は可燃性毒物を含むものであり、

前記燃料集合体に含まれる燃料棒の本数を N （ N は 2 以上の整数）、前記燃料棒のうち可燃性毒物を含む核燃料物質を封入した燃料棒の本数を n （ n は 1 以上かつ N より小さい整数）、前記 n 本の可燃性毒物入り燃料棒における核燃料物質のうちの可燃性毒物の濃度（質量％）を p 、前記燃料集合体の全本数にわたる平均ウラン 235 の濃縮度（質量％）を e とするとき、前記 e は 5 % 以上であり、

$$0.57e - 1.8 < p \cdot n / N < 0.57e - 0.8$$

の関係を満たすことを特徴とする軽水炉用燃料集合体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明の実施形態は、軽水炉用燃料集合体、軽水炉炉心設計方法および軽水炉用燃料集合体設計方法に関する。

10

20

30

40

50

【背景技術】

【0002】

一般に、軽水炉用燃料集合体および軽水炉の炉心においては、1運転サイクルの最後（EOC: End of Cycle）に余剰反応度がゼロになるように燃料が設計され、原子炉が運転される。

【0003】

沸騰水型軽水炉（BWR）では、たとえば酸化ガドリニウム（ガドリニア）などの可燃性毒物の中性子吸収能力がEOCで無くなるように濃度調整がなされる。BWRのプラント第1サイクルの炉心である初装荷炉心の場合に、一部の少数割合の燃料の可燃性毒物を意図的に燃え残し、残りの燃料で余剰反応度不足を補いつつ、炉心の熱的特性を改善する例もある。

10

【0004】

加圧水型軽水炉（PWR）では、ケミカルシム中のホウ酸濃度がEOCでゼロになるように濃度調整がなされる。核分裂性物質の濃縮度は、目標の抽出し燃焼度（ここでは達成燃焼度と同義）などに応じてその値が調整され、無駄に高い濃縮度は用いられない。

【0005】

また、核燃料リサイクルを行う場合、上述した軽水炉用燃料および軽水炉の炉心で使用された燃料は、炉心から取り出された後に、再処理が行われる。再処理により、ウラン同位体およびプルトニウム同位体が再使用のために抽出され、マイナーアクチノイドは高レベル放射性廃棄物として廃棄される。マイナーアクチノイドは有害度が大きいため、特に有害なマイナーアクチノイドを群分離と呼ぶ再処理法で分離する。分離したマイナーアクチノイドは、MOX（Mixed Oxide；混合酸化物）燃料に添加して高速炉で燃焼し、あるいはマイナーアクチノイドをターゲットにして加速器で照射することにより、有害度の小さい核種に変換する。このように、いわゆる分離変換をすることが考えられている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開昭62-106391号公報

【特許文献2】特開2008-145286号公報

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

核燃料リサイクルを行わずワンスルーサイクルとする場合は、使用済み燃料のまま最終処分がされる。ワンスルーサイクルでは、前述の分離変換のような処理を行わないため、マイナーアクチノイドの有害度が低減されない。

【0008】

一方、意図的に濃縮度の高いウラン燃料を使用することで、マイナーアクチノイドの生成量を低減させることができる。これは、ウラン235濃縮度の高いウラン燃料を使用することにより、ウラン235による核分裂反応の割合が増えてウラン238による吸収反応の割合が減少するため、マイナーアクチノイドの生成量が低減されるからである。しかし、ウラン235濃縮度を高くすることで余剰反応度が高くなり、余剰反応度が制御棒などの反応度制御機器による反応度値を超えてしまい、反応度制御が困難になることが考えられる。

40

【0009】

ウラン濃縮度を高めたときの余剰反応度は、可燃性毒物を用いて抑制することができる。マイナーアクチノイドの有害度低減のためにウラン濃縮度を高めた燃料集合体においても、可燃性毒物の利用は有効である。しかし、可燃性毒物は濃度や本数を決定するために複雑な計算を多数実行する必要があるため、これまで有効な設計がなされていなかった。

【0010】

50

本発明の実施形態は、上述した課題を解決するためになされたものであり、軽水炉において、ウラン濃縮度を高めたときの余剰反応度を低減することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記課題を解決するために、本発明の一実施形態は、軽水炉用燃料集合体の設計方法であって、前記軽水炉用燃料集合体は複数の平行な燃料棒を有し、前記燃料棒は長手方向に垂直な方向に互いに間隔をあけて配列され、前記燃料棒は被覆管と前記被覆管内に封入されて少なくとも一部に濃縮ウランを含む二酸化ウランを主成分とした核燃料物質とを有し、前記核燃料物質のうち少なくとも一部は可燃性毒物を含むものであり、当該設計方法は、前記燃料集合体に含まれる燃料棒の本数を N (N は 2 以上の整数)、前記燃料棒のうち可燃性毒物を含む核燃料物質を封入した可燃性毒物入り燃料棒の本数を n (n は 1 以上かつ N より小さい整数)、前記 n 本の可燃性毒物入り燃料棒における核燃料物質のうちの可燃性毒物の濃度 (質量%) を p 、前記燃料集合体の全本数にわたる平均ウラン 235 の濃縮度 (質量%) を e とするとき、解析または実験によって、複数の $p \cdot n / N$ と e のそれぞれの組合せが炉心として成立するか否かを示す炉心判定データを蓄積する炉心判定データ蓄積ステップと、炉心判定データに基づいて、 $p \cdot n / N$ と e との組合せが炉心として成立するか否かを判定する判定式を決定する炉心判定式決定ステップと、前記判定式に基づき、仮に設定された前記燃料集合体の構成が炉心として成立するか否かを判定する炉心成否判定ステップを備え、前記判定式は、正の定数 a_1 、 a_2 、 b および c (ただし、 $a_1 > a_2$) を用いて、炉心成立の条件を、 $a_1 \cdot e - b < p \cdot n / N < a_2 \cdot e - c$ とし、前記 e は 5% 以上であり、前記定数 a_1 および a_2 を 0.57 とし、前記定数 b を 1.8 とし、前記定数 c を 0.8 とするものであることを特徴とする。

【0012】

また、本発明の一実施形態は、軽水炉炉心の設計方法であって、前記軽水炉炉心は複数の燃料集合体を有し、前記燃料集合体は長手方向に垂直な方向に互いに集合体間隙を介して隣接して正方格子状に配列され、前記集合体間隙内には複数の反応度制御装置が配置され、前記軽水炉用燃料集合体は複数の平行な燃料棒を有し、前記燃料棒は長手方向に垂直な方向に互いに間隔をあけて配列され、前記燃料棒は被覆管と前記被覆管内に封入されて少なくとも一部に濃縮ウランを含む二酸化ウランを主成分とした核燃料物質とを有し、前記核燃料物質のうち少なくとも一部は可燃性毒物を含むものであり、当該設計方法は、前記複数の燃料集合体のうちの少なくとも一部の前記燃料集合体について、前記燃料集合体に含まれる燃料棒の本数を N (N は 2 以上の整数)、前記燃料棒のうち可燃性毒物を含む核燃料物質を封入した可燃性毒物入り燃料棒の本数を n (n は 1 以上かつ N より小さい整数)、前記 n 本の可燃性毒物入り燃料棒における核燃料物質のうちの可燃性毒物の濃度 (質量%) を p 、前記燃料集合体の全本数にわたる平均ウラン 235 の濃縮度 (質量%) を e とするとき、解析または実験によって、複数の $p \cdot n / N$ と e のそれぞれの組合せが炉心として成立するか否かを示す炉心判定データを蓄積する炉心判定データ蓄積ステップと、炉心判定データに基づいて、 $p \cdot n / N$ と e との組合せが炉心として成立するか否かを判定する判定式を決定する炉心判定式決定ステップと、前記判定式に基づき、仮に設定された前記燃料集合体の構成が炉心として成立するか否かを判定する炉心成否判定ステップを備え、前記判定式は、正の定数 a_1 、 a_2 、 b および c (ただし、 $a_1 > a_2$) を用いて、炉心成立の条件を、 $a_1 \cdot e - b < p \cdot n / N < a_2 \cdot e - c$ とし、前記 e は 5% 以上であり、前記定数 a_1 および a_2 を 0.57 とし、前記定数 b を 1.8 とし、前記定数 c を 0.8 とするものであることを特徴とする。

【0013】

また、本発明の一実施形態は、長手方向に互いに平行に延びる複数の燃料棒が長手方向に垂直な方向に互いに間隔をあけて平行に配列されて結束される軽水炉用燃料集合体であって、前記複数の燃料棒はそれぞれが、長手方向に延びる被覆管と、前記被覆管内に封入されて少なくとも一部に濃縮ウランを含む二酸化ウランを主成分とした核燃料物質と、を有するものであって、前記核燃料物質のうち少なくとも一部は可燃性毒物を含むものであ

り、前記燃料集合体に含まれる燃料棒の本数を N (N は 2 以上の整数)、前記燃料棒のうち可燃性毒物を含む核燃料物質を封入した燃料棒の本数を n (n は 1 以上かつ N より小さい整数)、前記 n 本の可燃性毒物入り燃料棒における核燃料物質のうちの可燃性毒物の濃度(質量%)を p 、前記燃料集合体の全本数にわたる平均ウラン 235 の濃縮度(質量%)を e とするとき、前記 e は 5% 以上であり、 $0.57e - 1.8 < p \cdot n / N < 0.57e - 0.8$ の関係を満たすことを特徴とする。

【発明の効果】

【0014】

本発明の実施形態によれば、軽水炉において、ウラン濃縮度を高めたときの余剰反応度を低減することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉炉心における1本の制御棒とそれを取り囲む4体の燃料集合体とその周辺を示す平断面図。

【図2】本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉炉心における燃料集合体の内部構成の一例を詳細に示す図であって、図1のII部の模式図。

【図3】本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉炉心における燃料集合体の内部構成の図2とは異なる一例を詳細に示す図であって、図1のII部の模式図。

【図4】本発明の一実施形態に係る沸騰水型用燃料集合体を構成する燃料棒の構造を示す平断面図。

20

【図5】本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉用燃料集合体において、可燃性毒物平均質量割合とウラン濃縮度との種々の組合せについて、炉心の成立・不成立を解析計算によって求めた結果を示すグラフの例。

【図6】図5の可燃性毒物平均質量割合の最適範囲内にはいる燃料集合体を沸騰水型原子炉で燃焼させた場合のサイクル燃焼度と余剰反応度との関係の解析結果の一例を示すグラフ。

【図7】本発明の一実施形態に係る燃料集合体の設計において、ウラン濃縮度を上昇させた場合の集合体無限増倍率の変化を模式的に示すグラフ。

【図8】本発明の一実施形態に係る燃料集合体の設計において、可燃性毒物の反応度変化に対応する可燃性毒物入り燃料棒本数の変化を模式的に示すグラフ。

30

【図9】本発明の一実施形態に係る燃料集合体の設計方法の手順を示す流れ図。

【図10】一般的な沸騰水型原子炉炉心におけるコントロールセルにおける反応度価値の高い上位10本の制御棒の制御棒反応度を示すグラフ。

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下、本発明の実施形態に係る軽水炉用燃料集合体、軽水炉炉心および軽水炉用燃料集合体設計方法について、図面を参照しながら説明する。ここでは、おもに沸騰水型原子炉用のものを例にとって説明するが、加圧水型原子炉用のものにも適用できる。

【0017】

図1は、本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉炉心における1本の制御棒とそれを取り囲む4体の燃料集合体とその周辺を示す平断面図である。ただし、図1では、各燃料集合体の詳細構造の図示は省略している。図2は、本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉炉心における燃料集合体の内部構成の一例を詳細に示す図であって、図1のII部の詳細な模式図である。図3は、本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉炉心における燃料集合体の内部構成の図2とは異なる一例を詳細に示す図であって、図1のII部の詳細な模式図である。図4は、本発明の一実施形態に係る沸騰水型用燃料集合体を構成する燃料棒の構造を示す平断面図である。

40

【0018】

沸騰水型原子炉炉心では、数百体の燃料集合体10が、水平面内で正方格子状に配列されている。ウランの濃縮度については、通常型ウラン燃料集合体では、集合体平均でたと

50

えば3.8%である。たとえば日本国内では、従来の通常型ウラン燃料集合体に係る施設はウラン濃縮度5.0%未満を前提として設計されている。これに対して、本実施形態における軽水炉用燃料集合体10においては、通常型ウラン燃料集合体より高い値でたとえば5.0%である。なお、以降、ウランの濃縮度は、5.0%の例を示すが、これに限定されない。後述するように、その効果が得られるものであれば、5.0%を超える濃縮度、あるいは5.0%未満の濃縮度であってもよい。

【0019】

各燃料集合体10内では、鉛直方向に互いに平行に延びる燃料棒11、12が、水平面内において正方格子状(図2および図3に示す例では縦横9×9の配列)に配列されている。燃料集合体10の鉛直な外周は、鉛直方向に延びるほぼ四角筒状のチャンネルボックス13によって囲まれている。燃料集合体10の中央部に2本のウォーターロッド14(図2および図3中で「W」で表示する。)が配置されている。ウォーターロッド14は、内部に水が流れる筒状の構造である。図2および図3に示す例では、ウォーターロッド14は、2本の円管であるが、1本または3本以上でもよく、また角筒状などでもよい。

10

【0020】

燃料棒11、12はそれぞれ、鉛直方向に延びる円管状の被覆管20と、被覆管20内に封入された核燃料物質21とを含む。核燃料物質21は、濃縮ウランを含む酸化ウランを含み、通常、円柱形のペレットに成形され、被覆管20内で、複数個のペレットが軸方向に積層される。燃料棒12は可燃性毒物入り燃料棒(図2および図3中で「G」で表示する。)であり、燃料棒12内の核燃料物質21は可燃性毒物(たとえばガドリニア)を含む。燃料棒11は可燃性毒物を含まない燃料棒(図2および図3中で「R」で表示する。)であり、燃料棒11内の核燃料物質21は可燃性毒物を含まない。

20

【0021】

BWRの反応度制御にはコントロールセル炉心を用いた制御が考えられている。これは、通常運転時の制御棒を挿入する単位格子を少数にした炉心設計である。通常運転時に出力制御に用いられる制御棒を4体の燃料集合体で取り囲んでコントロールセルとする。具体的には、コントロールセル内では、互いに隣接する2×2配列の燃料集合体10の中央に、平断面形状が十字状で、上下に延びる制御棒(反応度制御装置)30が配置されている。原子炉の通常運転時にはチャンネルボックス13の外側は軽水で満たされている。制御棒30は、チャンネルボックス13の外側の水中を上下方向に挿入・引抜きされて、原子炉出力を制御可能に構成されている。

30

【0022】

チャンネルボックス13の外側で、制御棒30の中心から対角位置に、核計装装置である局部出力領域モニタ(LPRM)31が配置されている。

【0023】

一般にガドリニアなどの可燃性毒物の熱伝導率は酸化ウランの熱伝導率よりも低い。そのため、可燃性毒物入り燃料棒12における核燃料物質21中のウラン235の濃縮度は、燃料集合体10に含まれる核燃料物質21中のウラン235の濃縮度の最高値より低くする。この構成により、可燃性毒物入り燃料棒12の熱出力が他の燃料棒の熱出力よりも大きくなることを避け、可燃性毒物入り燃料棒12の過熱を防ぐことができる。

40

【0024】

図2および図3に示すように、燃料集合体10内において、制御棒30に隣接する場所に可燃性毒物入り燃料棒12を配置しない設計としてもよい。この構成により、核分裂反応に寄与しやすい熱中性子が制御棒30に吸収される割合が低下しないため、制御棒30の反応度値を低下させずに炉心構成を実現できる。

【0025】

また、図2および図3に示すように、燃料集合体10内において、核計装装置31と隣接する場所に可燃性毒物入り燃料棒12を配置しない設計とするのが好ましい。この構成により、核計装装置31の精度を低下させることなく炉心構成を実現できる。

【0026】

50

また、図2および図3に示すように、燃料集合体10において、少なくとも1本の可燃性毒物入り燃料棒12について、その燃料棒12が正方格子状の燃料棒配列の配列方向に対応する4面のうち少なくとも1面が、他の燃料棒11、12と隣接しないような配置としてもよい。すなわち、少なくとも1本の可燃性毒物入り燃料棒12を、たとえばウォーターロッド14に隣接する位置や集合体最外周部のチャンネルボックス13に隣接する位置に配置する。この構成により、可燃性毒物が吸収反応を起こしやすい熱中性子が可燃性毒物と多く衝突し、中性子の可燃性毒物に吸収される割合が増える。そのため、可燃性毒物の反応度値が高くなり、余剰反応度を大幅に抑える効果がある。

【0027】

また、図2および図3に示すように、燃料集合体10において、少なくとも一部の可燃性毒物入り燃料棒12が、互いに隣接し合う配置としてもよい。可燃性毒物入り燃料棒12同士が隣接し合うことにより、隣接面の可燃性毒物が熱中性子と衝突する数が減少する。そのため、可燃性毒物の燃える速度が遅くなり、可燃性毒物の反応度が、可燃性毒物入り燃料棒12が隣接し合わない場合よりも持続する効果が得られる。

【0028】

図5は、本発明の一実施形態に係る沸騰水型原子炉用燃料集合体において、可燃性毒物平均質量割合とウラン濃縮度との種々の組合せについて、炉心の成立・不成立を解析計算によって求めた結果を示すグラフの例である。ここで、可燃性毒物平均質量割合は、可燃性毒物濃度 $p \times$ 可燃性毒物入り燃料棒本数割合で表わされる。さらに、可燃性毒物入り燃料棒本数割合は、可燃性毒物入り燃料棒本数 $n /$ 燃料集合体の燃料棒の総数 N で表わされる。したがって、可燃性毒物平均質量割合は、 $p \cdot n / N$ で表わされる。

【0029】

図5の核特性評価解析では、図2および図3に示す燃料集合体と同様の構成を仮定する。ここで、均質の燃料集合体が水平方向に縦横に無限に配列されていると仮定することにより、炉心の成立・否成立を判断することができる。可燃性毒物はガドリニウムであるとした。

【0030】

図5の核特性評価解析では、燃料集合体内の燃料棒配列を 9×9 とした。しかし、燃料集合体の核特性（中性子スペクトル）の炉心特性への影響が大きいことから、燃料集合体の水素 - ウラン比が同一であれば、燃料集合体内の燃料棒の数に依りなく、実質的に図5と同様の結果となる。たとえば、 10×10 配列、または 11×11 配列であっても、実質的に図5と同様の結果となる。

【0031】

図2の例では、可燃性毒物入り燃料棒12の本数 $n = 24$ 、燃料集合体の燃料棒の総数 $N = 74$ であり、図3の例では、 $n = 36$ 、 $N = 74$ である。

【0032】

ウラン濃縮度を e とする。このとき、可燃性毒物平均質量割合 ($p \cdot n / N$) とウラン濃縮度 e の種々の組合せについて、炉心が成立するか否かを解析によって求めた。その結果、図5に示すように、炉心が成立するか否かの境界条件として、2本の直線が得られた。すなわち、可燃性毒物平均質量割合 ($p \cdot n / N$) が、 $(0.57e - 1.8)$ より大きく $(0.57e - 0.8)$ より小さい範囲が可燃性毒物添加の最適割合である。すなわち、この場合の炉心成立要件を表わす判定式(1)は、

$$0.57e - 1.8 < p \cdot n / N < 0.57e - 0.8 \quad \dots (1)$$

で表わされる。

【0033】

したがって、判定式(1)を用いて実際の燃料集合体の設計を行うことができる。

【0034】

また、種々の条件の異なる燃料集合体の設計のためには、その条件に合った解析または実験により、十分な数の可燃性毒物平均質量割合 ($p \cdot n / N$) とウラン濃縮度 e の種々の組合せについて、炉心が成立するか否かを解析によって求めることによってデータを蓄

10

20

30

40

50

積し、その条件での図5に相当するグラフを得ることができる。そのグラフに基づいて、その条件における判定式(1)に相当する他の判定式が得られる。

【0035】

判定式は、一般的には次の判定式(2)の形式が適当と思われる。

$$a_1 \cdot e - b < p \cdot n / N < a_2 \cdot e - c \quad \dots (2)$$

ただし、 a_1 、 a_2 、 b および c は正の定数であり、 $a_1 > a_2$ である。

【0036】

上記判定式(1)、(2)は一次式であるが、一次式以外にも、2次式や他の種々の式がありうる。

【0037】

図6は、図5の可燃性毒物平均質量割合の最適範囲内にはいる燃料集合体を沸騰水型原子炉で燃焼させた場合のサイクル燃焼度と余剰反応度との関係の解析結果の一例を示すグラフである。図7は、本発明の一実施形態に係る燃料集合体の設計において、ウラン濃縮度を上昇させた場合の集合体無限増倍率の変化を模式的に示すグラフである。図8は、本発明の一実施形態に係る燃料集合体の設計において、可燃性毒物の反応度変化に対応する可燃性毒物入り燃料棒本数の変化を模式的に示すグラフである。なお、図7および図8では、ともに、直線が示されているが、これらは模式的に示されたものであり、必ずしも直線とは限らない。

【0038】

ここで、図10は、現在の典型的なBWRのコントロールセル炉心における反応度値の高い上位10本の制御棒の制御棒反応度の値を示す図である。このコントロールセルの制御棒反応度値は、図10に示すように、最大で0.1% k を若干上回る程度である。コントロールセルは改良型沸騰水型軽水炉(ABWR)の場合、最大でも29個であることから、コントロールセルで制御可能な余剰反応度は最大で3% k 以下である。

【0039】

燃料集合体10の可燃性毒物平均質量割合($p \cdot n / N$)とウラン濃縮度 e との組み合わせを、判定式(1)または(2)を満たす範囲になるように設計することにより、図6に示すように、原子炉運転サイクル期間中の余剰反応度を制御棒で反応度制御可能である0~3.0% k になるように設計することができる。これは、図7に示すウラン濃縮度 e を($e + \Delta e$)に変化させたときの反応度変化量($S(\Delta e)$)が、図8に示す可燃性毒物入り燃料棒の集合体内の本数 n と平均添加質量割合で変化する吸収材としての反応度変化量($S(\Delta G_d)$)と一致することによるものである。すなわち、可燃性毒物の総量を G_d だけ変化させることによって、ウラン濃縮度 e の変化 Δe を補償することができる。

【0040】

つぎに、以上説明した検討結果を利用して軽水炉用燃料集合体を設計する方法について、図9に沿って説明する。図9は、本発明の一実施形態に係る燃料集合体の設計方法の手順を示す流れ図である。

【0041】

初めに、軽水炉用燃料集合体の構成を所定の範囲で仮定して、可燃性毒物平均質量割合($p \cdot n / N$)とウラン濃縮度 e との種々の組合せについて、炉心の成立・不成立を解析計算または実験によって求め、図5に示すように、炉心成否判定データを蓄積する(ステップS10)。

【0042】

つぎに、ステップS10で得られた炉心成否判定データに基づいて、判定式(1)や(2)のように可燃性毒物平均質量割合($p \cdot n / N$)とウラン濃縮度 e との種々の組合せに対する炉心成否判定式を決定する(ステップS11)。

【0043】

つぎに、軽水炉用燃料集合体の可燃性毒物平均質量割合($p \cdot n / N$)とウラン濃縮度 e との組合せを具体的に仮定して(ステップS12)、その組合せについて、ステップS

10

20

30

40

50

11で得られた炉心成否判定式に基づいて炉心成否を判定する(ステップS13)。

【0044】

ステップS13の結果が炉心不成立(No)であった場合は、可燃性毒物平均質量割合($p \cdot n / N$)とウラン濃縮度 e との組合せを変更して、再びステップS12, S13を行う。ステップS13の結果が炉心成立(Yes)であった場合は、そのときの可燃性毒物平均質量割合($p \cdot n / N$)とウラン濃縮度 e との組合せによって、燃料集合体の設計として決定する(ステップS14)。

【0045】

以上説明した設計方法によれば、軽水炉において、ウラン濃縮度を高めたときの余剰反応度を低減することができる。また、あらかじめ炉心成否判定式を決定しておくことにより、具体的な燃料集合体の設計において、種々のパラメータを変更した場合について、炉心の成否を簡単に確認することができ、設計作業の迅速化および省力化を図ることができる。

10

【0046】

この実施形態で、核燃料物質に添加される可燃性毒物としては、ガドリニウムを含む化合物、もしくはエルビウムを含む化合物、もしくはホウ素を含む化合物であることが好ましい。

【0047】

さらに、核燃料物質に添加される可燃性毒物がガドリニアである場合に、その最高質量割合が20質量%未満であることが好ましい。それは、ガドリニアの最高質量割合が20質量%以上であると、ガドリニアと酸化ウランとの混合物が固溶体を生成しにくくなるからである。

20

【0048】

ここで説明する実施形態における可燃性毒物として、奇数質量数(たとえば155または157)のガドリニウムの濃縮を行ったガドリニウムを用いるのが好ましい。これによって、ガドリニウムが持つ吸収断面積が大きくなるため、可燃性毒物の添加量を少なくする効果が得られる。

【0049】

また、コントロールセルを含む軽水炉炉心に燃料集合体を装荷することにより、制御棒の動作による反応度変化範囲を小さく抑えられ、軽水炉炉心における燃料集合体の熱的健全性を満たしやすくする効果が得られる。

30

【0050】

以上、本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更、組み合わせを行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

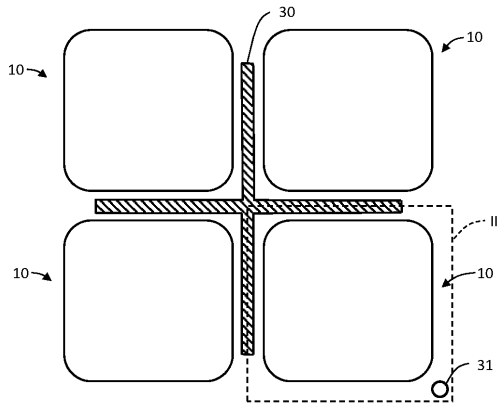
【符号の説明】

【0051】

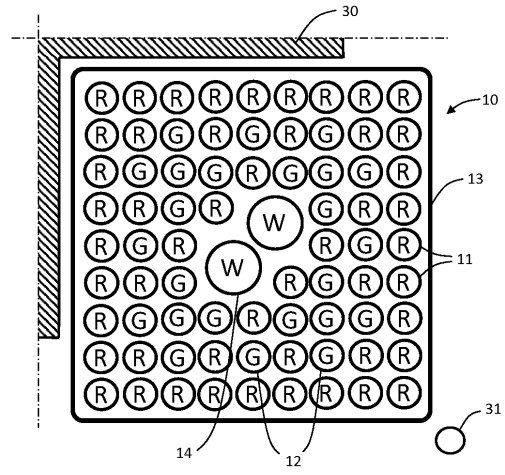
10...燃料集合体、 11, 12...燃料棒、 13...チャンネルボックス、 14...ウォーターロッド、 20...被覆管、 21...核燃料物質、 30...制御棒(反応度制御装置)、 31...核計装置(局部出力領域モニタ、LPRM)

40

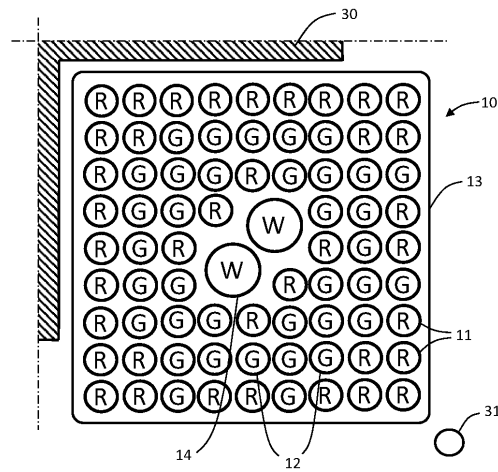
【図1】



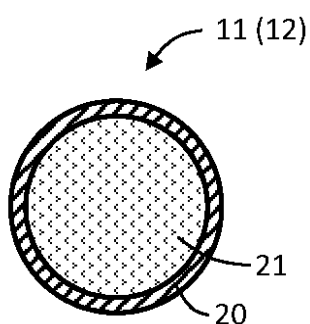
【図2】



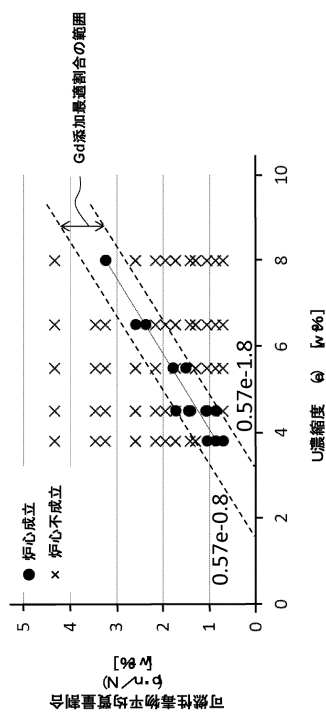
【図3】



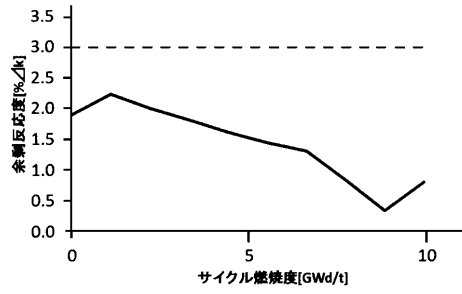
【図4】



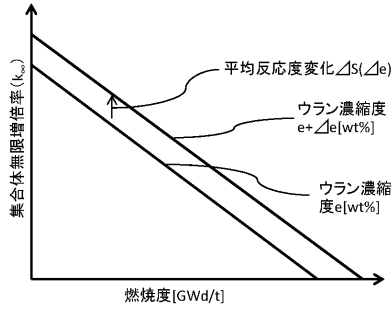
【図5】



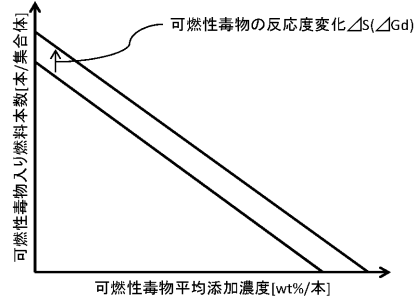
【 図 6 】



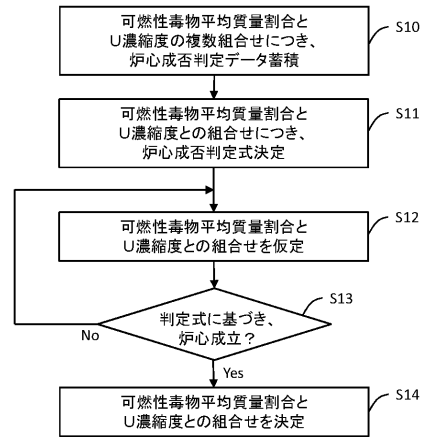
【 図 7 】



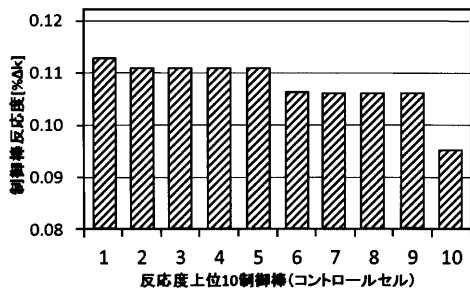
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



フロントページの続き

- (72)発明者 杉田 宰
神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 木村 礼
神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 相澤 利枝
神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 吉田 紀之
神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内

審査官 大門 清

- (56)参考文献 特開2014-048159(JP,A)
特開2000-284081(JP,A)
特開2010-122063(JP,A)
特開平09-080180(JP,A)
米国特許出願公開第2014/0064433(US,A1)
特開2007-309717(JP,A)
特開平10-115690(JP,A)
特開2002-148379(JP,A)
特開2002-122687(JP,A)
米国特許出願公開第2002/0080908(US,A1)
米国特許第06141396(US,A)
米国特許出願公開第2011/0080987(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G21C 3/326
G21C 3/328
G21C 7/04
G21C 5/00