

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4138763号  
(P4138763)

(45) 発行日 平成20年8月27日 (2008. 8. 27)

(24) 登録日 平成20年6月13日 (2008. 6. 13)

(51) Int. Cl. F I  
**G 2 1 C 3/328 (2006. 01)** G 2 1 C 3/30 G D P T  
**G 2 1 C 3/28 (2006. 01)** G 2 1 C 3/28 A

請求項の数 7 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2005-52759 (P2005-52759)	(73) 特許権者	000006208 三菱重工業株式会社
(22) 出願日	平成17年2月28日 (2005. 2. 28)		東京都港区港南二丁目16番5号
(65) 公開番号	特開2006-234719 (P2006-234719A)	(74) 代理人	100089118 弁理士 酒井 宏明
(43) 公開日	平成18年9月7日 (2006. 9. 7)	(72) 発明者	濱崎 学 東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内
審査請求日	平成19年8月30日 (2007. 8. 30)	(72) 発明者	星 雅也 東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内
		(72) 発明者	田淵 士郎 神戸市兵庫区和田崎町一丁目1番1号 三菱重工業株式会社 神戸造船所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 加圧水型原子炉の燃料集合体及び燃料集合体の設計方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、原子炉の定格熱出力と運転期間及び最高燃焼度制限によって決定される燃料装荷量に基づき出力ピーキング係数を考慮して燃料の健全性を確保するように前記燃料ペレットの外径が設定され、この設定された外径を基準として前記燃料ペレットの外径が増加することで前記燃料集合体に装荷された前記ウランの重量増加が生じ、前記ウランの重量増加に伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、前記燃料ペレットの外径の増加による減速材の減少がもたらす減速不足によって生じる反応度の低下分を上回る太径化利得領域が求まり、前記反応度が上回る太径化利得領域内で前記燃料ペレットの外径が設定されたことを特徴とする加圧水型原子炉の燃料集合体。

【請求項2】

請求項1に記載の加圧水型原子炉の燃料集合体において、前記反応度が上回る太径化利得領域は、前記燃料ペレットの外径の増加によってバッチ燃焼度が低下しても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度を低下させる領域であることを特徴とする加圧水型原子炉の燃料集合体。

【請求項3】

ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集

合体において、前記複数の燃料棒が $17 \times 17$ の正方格子状で、燃料棒ピッチが $12.6$  mmに配列された場合、前記燃料ペレットの外径を $8.25$  mmより大きく、且つ、 $8.62$  mm以下に設定したことを特徴とする加圧水型原子炉の燃料集合体。

【請求項4】

ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、前記複数の燃料棒が $15 \times 15$ の正方格子状で、燃料棒ピッチが $14.3$  mmに配列された場合、前記燃料ペレットの外径を $9.35$  mmより大きく、且つ、 $10.11$  mm以下に設定したことを特徴とする加圧水型原子炉の燃料集合体。

【請求項5】

ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、前記複数の燃料棒が $14 \times 14$ の正方格子状で、燃料棒ピッチが $14.1$  mmに配列された場合、前記燃料ペレットの外径を $9.35$  mmより大きく、且つ、 $9.64$  mm以下に設定したことを特徴とする加圧水型原子炉の燃料集合体。

【請求項6】

ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、原子炉の定格熱出力と運転期間及び最高燃焼度制限によって決定される燃料装荷量に基づき出力ピーキング係数を考慮して燃料の健全性を確保するように前記燃料ペレットの外径が設定され、この設定された外径を基準として前記燃料ペレットの外径を増加させることで前記燃料集合体に装荷した前記ウランの重量を増加させ、前記ウランの重量増加に伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、前記燃料ペレットの外径の増加による減速材の減少がもたらす減速不足によって生じる反応度の低下分を上回る太径化利得領域を求め、前記反応度が上回る太径化利得領域内で前記燃料ペレットの外径を設定したことを特徴とする燃料集合体の設計方法。

【請求項7】

請求項6に記載の燃料集合体の設計方法において、前記反応度が上回る太径化利得領域は、前記燃料ペレットの外径の増加によってパッチ燃焼度が低下しても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度を低下させる領域であることを特徴とする燃料集合体の設計方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、加圧水型原子炉の燃料集合体及び燃料集合体の設計方法に関し、特に、燃料ペレットの太径化による反応度の向上を図ったものである。

【背景技術】

【0002】

加圧水型原子炉（PWR：Pressurized Water Reactor）では、軽水を原子炉冷却材及び中性子減速材として使用し、炉心全体にわたって沸騰しない高温高压水とし、この高温高压水を蒸気発生器に送って熱交換により蒸気を発生させ、この蒸気をタービン発電機へ送って発電するものである。

【0003】

このような加圧水型原子炉にて、原子炉容器内には、複数の燃料棒の間に所定数の制御棒が挿入されて格子状に配列された燃料集合体が所定数格納されている。この燃料集合体は、例えば、 $17 \times 17$ の正方配列を形成する燃料棒 $264$ 本、炉内計装用案内シンプル $1$ 本、制御棒案内シンプル $24$ 本より構成されている。そして、この燃料棒は、低濃縮二酸化ウランの焼結ペレットをジルカロイ被覆管に挿入し、ヘリウムを加圧封入した密封構造となっている。

【0004】

10

20

30

40

50

ところで、原子炉では、炉心寿命が燃料棒の燃焼特性から推定されるものであり、高燃焼度化を図るために燃料棒の性能を向上させる各種の提案がなされている。例えば、下記特許文献1では、被覆管内に多数の二酸化ウランペレットを積重し、上部端栓と下部端栓により内部を密封し、下部端栓内に設けた中空部を被覆管の内部と連通することでガス空間容積を拡大し、高燃焼度化運転を可能としている。

【0005】

【特許文献1】特開平11-142560号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

燃料集合体の燃焼度は、燃料棒の性能に依存するものであり、炉心熱出力、運転期間、最高燃焼度などから燃料装荷重量が決定され、この燃料装荷重量から燃料棒の本数、長さ、直径（ペレットの直径）が決まり、ウランと軽水との比率と燃料経済性の関係から燃料棒ピッチが決定されるようになっている。この場合、ペレットの直径は、ウランと軽水との比率に基づく減速率から設定されるが、常に燃料経済性の向上が要請され、燃料の反応度の向上が望まれている。

【0007】

本発明は上述した課題を解決するものであり、燃料ペレットの直径の最適化によって反応度を向上させることで炉心寿命を延長可能とした加圧水型原子炉の燃料集合体及び燃料集合体の設計方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記の目的を達成するための請求項1の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体は、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、原子炉の定格熱出力と運転期間及び最高燃焼度制限によって決定される燃料装荷量に基づき出力ピーキング係数を考慮して燃料の健全性を確保するように前記燃料ペレットの外径が設定され、この設定された外径を基準として前記燃料ペレットの外径が増加することで前記燃料集合体に装荷された前記ウランの重量増加が生じ、前記ウランの重量増加に伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、前記燃料ペレットの外径の増加による減速材の減少がもたらす減速不足によって生じる反応度の低下分を上回る太径化利得領域が求まり、前記反応度が上回る太径化利得領域内で前記燃料ペレットの外径が設定されたことを特徴とするものである。

【0009】

請求項2の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体では、前記反応度が上回る太径化利得領域は、前記燃料ペレットの外径の増加によってバッチ燃焼度が低下しても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度を低下させる領域であることを特徴としている。

【0010】

請求項3の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体は、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、前記複数の燃料棒が17×17の正方格子状で、燃料棒ピッチが12.6mmに配列された場合、前記燃料ペレットの外径を8.25mmより大きく、且つ、8.62mm以下に設定したことを特徴とするものである。

【0011】

請求項4の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体は、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、前記複数の燃料棒が15×15の正方格子状で、燃料棒ピッチが14.3mmに配列された場合、前記燃料ペレットの外径を9.35mmより大きく、且つ、10.11mm以下に設定したことを特徴

10

20

30

40

50

とするものである。

【0012】

請求項5の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体は、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、前記複数の燃料棒が14×14の正方格子状で、燃料棒ピッチが14.1mmに配列された場合、前記燃料ペレットの外径を9.35mmより大きく、且つ、9.64mm以下に設定したことを特徴とするものである。

【0013】

請求項6の発明の燃料集合体の設計方法は、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットがジルコニウム合金製の被覆管に充填されて燃料棒が形成され、該燃料棒が複数格子状に束ねられて構成された加圧水型原子炉の燃料集合体において、原子炉の定格熱出力と運転期間及び最高燃焼度制限によって決定される燃料装荷量に基づき出力ピーキング係数を考慮して燃料の健全性を確保するように前記燃料ペレットの外径が設定され、この設定された外径を基準として前記燃料ペレットの外径を増加させることで前記燃料集合体に装荷した前記ウランの重量を増加させ、前記ウランの重量増加に伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、前記燃料ペレットの外径の増加による減速材の減少がもたらす減速不足によって生じる反応度の低下分を上回る太径化利得領域を求め、前記反応度が上回る太径化利得領域内で前記燃料ペレットの外径を設定したことを特徴とするものである。

【0014】

請求項7の発明の燃料集合体の設計方法では、前記反応度が上回る太径化利得領域は、前記燃料ペレットの外径の増加によってバッチ燃焼度が低下しても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度を低下させる領域であることを特徴としている。

【発明の効果】

【0015】

請求項1の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体によれば、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットをジルコニウム合金製の被覆管に充填して燃料棒を形成し、この燃料棒を複数格子状に束ねて燃料集合体を構成し、原子炉の定格熱出力と運転期間及び最高燃焼度制限によって決定される燃料装荷量に基づき出力ピーキング係数を考慮して燃料の健全性を確保するように燃料ペレットの外径を設定し、この設定された外径を基準として燃料ペレットの外径が増加することでこの燃料集合体に装荷されたウランの重量増加が生じ、このウランの重量増加に伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、燃料ペレットの外径の増加による減速材の減少がもたらす減速不足によって生じる反応度の低下分を上回る太径化利得領域が求まり、この反応度が上回る太径化利得領域内で燃料ペレットの外径が設定されている。燃料ペレットの外径を大きくすると、減速材の量の減少により減速が悪化して反応度が低下するが、ウラン装荷量が増加して燃焼度が低下するために反応度が増加するものであり、この両者の関係において、燃料ペレットの外径の増加、即ち、ウラン重量の増加による反応度の増加分が減速材の減少がもたらす減速不足による反応度の低下分を上回る領域があり、この領域内で燃料ペレットの外径を設定することで燃料ペレットの直径が最適化され、反応度が増加して炉心寿命を延長させることができる。

【0016】

請求項2の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体によれば、反応度が上回る太径化利得領域を、燃料ペレットの外径の増加によってバッチ燃焼度が低下しても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度を低下させる領域としたので、燃料ペレットの直径の増加によるバッチ燃焼度の低下分を、サイクル燃焼度の低下分が上回る領域は、燃料棒の取替本数を減少させる領域であり、経済性を向上させることができる。

【0017】

請求項3の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体によれば、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットをジルコニウム合金製の被覆管に充填して燃料棒を形成し、この燃料棒を複数格子状に束ねて構成された燃料集合体を構成し、複数の燃料棒が17×17の正方格子状

10

20

30

40

50

で、燃料棒ピッチが12.6mmに配列された場合、燃料ペレットの外径を8.25mmより大きく、且つ、8.62mm以下に設定したので、17×17型の燃料集合体にて、燃料ペレットの直径が最適化され、反応度を増加させることができる。

【0018】

請求項4の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体によれば、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットをジルコニウム合金製の被覆管に充填して燃料棒を形成し、この燃料棒を複数格子状に束ねて構成された燃料集合体を構成し、複数の燃料棒が15×15の正方格子状で、燃料棒ピッチが14.3mmに配列された場合、燃料ペレットの外径を9.35mmより大きく、且つ、10.11mm以下に設定したので、15×15型の燃料集合体にて、燃料ペレットの直径が最適化され、反応度を増加させることができる。

10

【0019】

請求項5の発明の加圧水型原子炉の燃料集合体によれば、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットをジルコニウム合金製の被覆管に充填して燃料棒を形成し、この燃料棒を複数格子状に束ねて構成された燃料集合体を構成し、複数の燃料棒が14×14の正方格子状で、燃料棒ピッチが14.1mmに配列された場合、燃料ペレットの外径を9.35mmより大きく、且つ、9.64mm以下に設定したので、14×14型の燃料集合体にて、燃料ペレットの直径が最適化され、反応度を増加させることができる。

【0020】

請求項6の発明の燃料集合体の設計方法によれば、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレットをジルコニウム合金製の被覆管に充填して燃料棒を形成し、この燃料棒を複数格子状に束ねて構成された燃料集合体を構成し、原子炉の定格熱出力と運転期間及び最高燃焼度制限によって決定される燃料装荷量に基づき出力ピーキング係数を考慮して燃料の健全性を確保するように燃料ペレットの外径を設定し、この設定された外径を基準として燃料ペレットの外径を増加させることで燃料集合体に装荷したウランの重量を増加させ、このウランの重量増加に伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、燃料ペレットの外径の増加による減速材の減少がもたらす減速不足によって生じる反応度の低下分を上回る太径化利得領域を求め、この反応度が上回る太径化利得領域内で燃料ペレットの外径を設定している。燃料ペレットの外径を大きくすると、減速材の量の減少により減速が悪化して反応度が低下するが、ウラン装荷量が増加して燃焼度が低下するために反応度が増加するものであり、この両者の関係において、燃料ペレットの外径、即ち、ウラン重量の増加による反応度の増加分が減速材の減少がもたらす減速不足による反応度の低下分を上回る領域があり、この領域内で燃料ペレットの外径を設定することで燃料ペレットの直径が最適化され、反応度が増加して炉心寿命を延長させることができる。

20

30

【0021】

請求項7の発明の燃料集合体の設計方法によれば、反応度が上回る太径化利得領域を、燃料ペレットの外径の増加によってバッチ燃焼度が低下しても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度を低下させる領域としたので、燃料ペレットの直径の増加によるバッチ燃焼度の低下分を、サイクル燃焼度の低下分を上回る領域は、燃料棒の取替本数を減少させる領域であり、経済性を向上させることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

40

【0022】

以下に添付図面を参照して、本発明に係る加圧水型原子炉の燃料集合体及び原子炉の好適な実施例を詳細に説明する。なお、この実施例によりこの発明が限定されるものではない。

【実施例1】

【0023】

図1は、本発明の実施例1に係る加圧水型原子炉を有する発電設備の概略構成図、図2は、実施例1の加圧水型原子炉の内部構造を表す概略構成図、図3は、加圧水型原子炉の炉心構造を表す概略図、図4は、実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体の概略構成図、図5は、実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体における配列構成を表す概略断面図、図

50

6は、実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体における燃料棒の一部断面図、図7は、実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体における燃料棒の詳細を表す要部断面図、図8は、 $17 \times 17$ 型燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率を表すグラフ、図9は、燃料ペレット直径に対する中性子増倍率を表すグラフ、図10は、燃料ペレット直径に対するサイクル燃焼度及びバッチ燃焼度の低下割合を表すグラフ、図11は、燃料ペレット直径の最適領域を表すグラフである。

#### 【0024】

実施例1の原子炉は、軽水を原子炉冷却材及び中性子減速材として使用し、炉心全体にわたって沸騰しない高温高压水とし、この高温高压水を蒸気発生器に送って熱交換により蒸気を発生させ、この蒸気をタービン発電機へ送って発電する加圧水型原子炉（PWR：Pressurized Water Reactor）である。

10

#### 【0025】

即ち、この加圧水型原子炉を有する発電設備において、図1に示すように、原子炉格納容器11内には、加圧水型原子炉12及び蒸気発生器13が格納されており、この加圧水型原子炉12と蒸気発生器13とは冷却水配管14、15を介して連結されており、冷却水配管14に加圧器16が設けられ、冷却水配管15に冷却水ポンプ17が設けられている。この場合、減速材及び一次冷却水としてとして軽水を用い、炉心部における一次冷却水の沸騰を抑制するために、一次冷却系統は加圧器16により $150 \sim 160$ 気圧程度の高い圧力をかけている。従って、加圧水型原子炉12にて、燃料として低濃縮ウランまたはMOXにより一次冷却水として軽水が加熱され、高温の軽水が加圧器16により所定の

20

#### 【0026】

蒸気発生器13は、原子炉格納容器11の外部に設けられたタービン18及び復水器19と冷却水配管20、21を介して連結されており、冷却水配管21に給水ポンプ22が設けられている。また、タービン18には発電機23が接続され、復水器19には冷却水（例えば、海水）を給排する供給管24及び配水管25が連結されている。従って、蒸気発生器13にて、高温高温の軽水と熱交換を行って生成された蒸気は、冷却水配管20を通してタービン18に送られ、この蒸気によりタービン18を駆動して発電機23により

30

#### 【0027】

また、加圧水型原子炉12において、図2及び図3に示すように、原子炉容器31は、その内部に炉内構造物が挿入できるように、原子炉容器本体32とその上部に装着される原子炉容器蓋33により構成されており、この原子炉容器本体32に対して原子炉容器蓋33が開閉可能となっている。原子炉容器本体32は、上部が開口して下部閉塞された円筒形状をなし、内面に熱遮蔽材34が固定されており、上部に一次冷却水（軽水）を給排する入口ノズル35及び出口ノズル36が形成されている。

#### 【0028】

この原子炉容器本体32内にて、上下の炉心板37、38により炉心39が形成されており、内部に多数の燃料集合体40が挿入されている。この炉心39は、燃料の取替順序考慮して3乃至4つの領域（新燃料、1サイクル照射燃料、2サイクル照射燃料、3サイクル照射燃料）に区分されており、且つ、90度の対称性を維持するように設計されている。本実施例では、 $17 \times 17$ 型の燃料集合体40の形式に設計されており、各燃料集合体の集合体ピッチ $P_1$ は、 $215 \text{ mm}$ に設定されている。また、上部炉心板37の上部には支柱41を介して上部炉心支持板42が固定され、この上部炉心支持板42と上部炉心板37との間に多数の制御棒クラスタ案内管43が支持されている。更に、原子炉容器蓋33に制御棒駆動装置45が支持されており、各制御棒クラスタ駆動軸46は制御棒クラスタ案内管43内を通過して燃料集合体40まで延出され、下部に制御棒クラスタ（制御棒

40

50

) 47が取付けられている。

【0029】

一方、下部炉心板38の下部には下部炉心支持板48が固定され、この下部炉心支持板48に炉内計装案内管49が支持されている。

【0030】

従って、制御棒駆動装置45により制御棒クラスタ47を移動して燃料集合体40に図示しない制御棒を挿入することで、炉心39内での核分裂を制御し、発生した熱エネルギーにより原子炉容器31内に充填された軽水が加熱され、高温の軽水が出口ノズル36から排出され、上述したように、蒸気発生器13に送られる。即ち、燃料集合体40を構成する燃料としてのウランまたはプルトニウムが核分裂することで中性子を放出し、減速材及び一次冷却水としての軽水が、放出された高速中性子の運動エネルギーを低下させて熱中性子とし、新たな核分裂を起こしやすくすると共に、発生した熱を奪って冷却する。また、制御棒クラスタ47を燃料集合体40に挿入することで、炉心39内で生成される中性子数を調整し、また、原子炉を緊急に停止するときには炉心に急速に挿入される。

【0031】

この燃料集合体40は、図4及び図5に示すように、多数の燃料棒51が支持格子52により格子状に束ねられて構成され、上端部に上部ノズル53が固定される一方、下端部に下部ノズル54が固定されている。なお、図5では、煩雑になるため、燃料棒51間の格子部分を省略し、外周部のみ模式的に図示した。本実施例の燃料集合体40は17×17型であり、264本の燃料棒51と、制御棒47が挿入される24本の制御棒案内シンプル55と、図示しない炉内計装用検出器が挿入される1本の炉内計装用案内シンプル56とからなっており、各燃料棒51の燃料棒ピッチ $P_2$ は、12.6mmに設定されている。

【0032】

そして、燃料棒51において、図6に示すように、燃料ペレット61は、核分裂性物質としてのウラン235を5%以下に濃縮した二酸化ウランを焼き固め、ペレット状に形成したものである。燃料被覆管62はジルコニウム合金製であり、内部に所定数の燃料ペレット61が充填され、上部にスプリング63が装着されることで押さえられると共に、内部にヘリウムガスが充填された状態で、上端部及び下端部に端栓64, 65が固定されることで、燃料棒51が形成されている。

【0033】

ところで、上述した加圧水型原子炉12にあっては、この原子炉が所定期間にわたって定格熱出力が維持できるようにするため、炉心熱出力、運転期間、燃料集合体の最高燃焼度を設定し、ここから必要な燃料装荷重量が決定される。そして、燃料の健全性を維持できる最大線出力密度を満足できるように出力ピーキング係数を考慮して燃料棒の本数、長さが決まり、燃料装荷重量と本数から燃料棒の直径が決まる。その後、燃料被覆管を適切に選定し、燃料棒のふるまい(照射成長、ペレット変形、ペレット温度、被覆管変形、FPガス放出、被覆管腐食)を考慮して運転時の異常な過度変化時においても燃料の健全性が確保されるように、燃料被覆管の内径及び外径が決定される。一方、軽水対ウランの体積比(H/U比)と燃料経済性(中性子増倍率)の関係は、H/U比がある値になると中性子増倍率が極大値をもつような上に凸なカーブとなり、加圧水型原子炉においては、減速材(軽水)温度が上昇したときに中性子増倍率が低下するように最適値よりも左側、つまり、H/U比が更に大きくなると、中性子増倍率が増加する領域で燃料棒ピッチを選定している。このことは、「軽水炉燃料のふるまい」第27頁(財団法人原子力安全研究協会 軽水炉燃料のふるまい編集委員会 第4版平成15年7月)に記載されている。そのため、一旦、燃料棒ピッチが選定されると、炉心内での取り合いが確定されるため、最適化できる燃料棒の直径の範囲は非常に限定される。

【0034】

一般に、燃料棒のピッチを固定した条件で、燃料棒(燃料ペレット)の直径を大きくすると、H/U比が低下、即ち、減速材が減少して減速が悪くなり、反応度が低下するもの

10

20

30

40

50

と考えられている。ところが、燃料集合体の寿命中の発生熱量を一定にした場合、燃料棒（燃料ペレット）の直径を大きくすると、ウラン装荷量が増加するため、取り出し燃焼度が低下することにより反応度が増加する領域がある。

【0035】

本出願人による燃料集合体の設計方法では、燃料経済性（中性子増倍率）を向上させるための燃料棒（燃料ペレット）の最適化に際し、燃料集合体から取り出す熱量を一定とした条件のもとで、この燃料棒の直径や燃料ペレットの直径を変化させてH/U比が変化したときに、燃料の重量が変動することによる燃焼度の変化を考慮して中性子増倍率を評価する。これにより、燃料棒ピッチが一定の条件では、燃料棒や燃料ペレットの直径が変化すると、中性子増倍率を評価する燃焼度が変化するため、H/U比対中性子増倍率のカーブがずれてくる。例えば、燃料棒及び燃料ペレットを太径化すると、同一の取り出し熱量の下では燃焼度が低下するために中性子増倍率は大きくなる。即ち、燃料棒及びペレットの直径を変化させる前のH/U比対中性子増倍率のカーブよりも大きい値をとるようになる。この結果、従来、設計点よりも燃料集合体から取り出す熱量一定の下では燃料棒及び燃料ペレットをある範囲で太径化したときに、中性子増倍率が増加する領域があることが判明した。

10

【0036】

詳細に説明すると、加圧水型原子炉の炉心は、基本的に単一種（濃縮度）の燃料で構成することができ、その燃料の反応度特性から炉心寿命に関する特性が推定できる。そのための基本となるパラメータが「当該燃料で構成される炉心のサイクル末期における全燃料集合体の平均燃焼度」を与える「バッチ燃焼度」であり、サイクル末期で想定するほう素濃度残量、出力レベルの下でちょうど臨界を維持し得る燃焼度として定義される。これは、想定する炉心の大きさ（燃料集合体の体数）が変わると中性子の漏れが変わるために若干の影響を受けるが、基本的には「燃料の特性」量であって、個別炉心の特性ではない。炉心を構成する燃料集合体の濃縮度が高くなれば、バッチ燃焼度は高くなり、例えば、4.8wt% 17×17型燃料であれば、バッチ燃焼度は約34GWd/t前後となる。そして、加圧水型原子炉の炉心寿命は、炉心を構成する燃料全体の平均燃焼度が、このバッチ燃焼度に達した時点で終了すると考えて、ほぼ差し支えない。従って、一般には、バッチ燃焼度が高い燃料で構成される炉心の寿命は長くなる。あるいは、バッチ燃焼度の大きい燃料を用いることによって、同一炉心寿命を維持するための新燃料取替体数を少なくすることができる。

20

30

【0037】

上述したバッチ燃焼度をB (MWd/t)、取替バッチ数（炉心内の燃料集合体の領域数）をn、確保可能なサイクル燃焼度（炉心寿命）を (MWd/t) とすると、以下のような関係がある。

$$B = (n + 1) / 2 \cdot$$

この数式を変形すると、

$$n = 2B / - 1$$

となる。

【0038】

この上記数式には燃料の濃縮度やウラン装荷量、更に炉心の出力レベルなどは直接に表れていない。これらは、バッチ燃焼度Bやサイクル燃焼度（炉心寿命）の変化として考慮される。上記数式から、燃料設計を変えてバッチ燃焼度Bが低下したとしても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度（炉心寿命）を低下させることができれば、取替バッチ数nは増加することになる。この取替バッチ数nの増加は、取替燃料体数の減少と等価であり、同じサイクル長さの下で、より有利な燃料運用を図ることを可能とすることができ、経済性を向上することができる。

40

【0039】

図7に示すように、燃料棒51にて、直径D<sub>p</sub>を有する燃料ペレット61は、所定の隙間Gをもって燃料被覆管62内に充填されており、この燃料被覆管62は所定の厚さTで

50

外径  $D_1$  に設定されている。図 8 は、燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフであり、燃料ペレット 61 の直径  $D_p$  を 8.19 mm ~ 11.00 mm まで変化させたときの中性子増倍率の変化割合を表している。なお、上述した従来の燃料集合体の設計方法で設定した燃料ペレット 61 の直径  $D_p$  は 8.19 mm であり、4.8 wt% 17 × 17 型燃料のバッチ燃焼度  $B$  は 34200 MWd / t であることから、燃料ペレット 61 の直径  $D_p = 8.19$  mm にて、集合体燃焼度  $B = 34200$  MWd / t のときの中性子増倍率  $k$ （相対値）を 1.0 と設定している。また、燃料ペレット 61 の直径  $D_p$  を変化させたとしても、燃料被覆管 62 との隙間  $G$  と燃料被覆管 62 の厚さ  $T$  は変化しないものとして考える。

#### 【0040】

従って、図 8 のグラフに示すように、燃焼期間（集合体燃焼度）の増加によって中性子増倍率  $k$ （反応度）は低下し、また、燃料ペレットの直径  $D_p$  を増加させると減速材量が減少するために中性子増倍率は低下する。バッチ燃焼度は、炉心を臨界にちょうど維持するために必要な反応度（中性子増倍率）を与える点であり、ペレット径を太くしても  $k$  を評価する燃焼度をペレット径が 8.19 mm のときのバッチ燃焼度（ $B = 34200$  MWd / t）に固定すると、燃料ペレットの太径化によって中性子増倍率は単調に低下（図 8 のグラフの 印）する。この場合は、ペレット径を太径化しても燃焼度が同一になるようにサイクル長さを延長させたことになる。一方、サイクル長さを固定して考えた場合、燃料ペレットの太径化に伴うウラン重量の増加によってサイクル燃焼度は低下（図 8 のグラフの 印）する。即ち、燃料ペレットを太径化してその直径  $D_p$  を燃料棒全長にわたって  $D_0$  から  $D_1$  に変更した場合、同じサイクル長さ（日数）を与えるサイクル燃焼度  $\beta_0$  と  $\beta_1$  には以下の関係が成立するため、燃料ペレットの太径化によってサイクル燃焼度は低下する。

$$\beta_1 / \beta_0 = (D_0 / D_1)^2$$

#### 【0041】

なお、前述したように、炉心熱出力、運転期間、燃料集合体の最高燃焼度から燃料装荷重量が決定され、出力ピーキング係数を考慮して燃料棒の本数、長さが決まり、燃料装荷重量と本数から燃料棒の直径が決まり、燃料棒のふるまいを考慮して燃料被覆管の内径及び外径が決定され、ペレットの直径が燃料被覆管の内径及び外径と、ウランと軽水との比率に基づく減速率から設定されるものであり、この燃料ペレットの直径  $D_0$  は、この方法で設定されたものであり、また、ペレットの直径  $D_0$  に対応したサイクル燃焼度が  $\beta_0$  である。

#### 【0042】

また、図 9 は、燃料ペレットの直径に対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフである。図 8 のグラフから、ペレット直径  $D_p = D_0 = 8.19$  のときに中性子増倍率  $k$ （相対値）が 1.0 となる燃焼度（図 8 中のペレット直径  $D_p = D_0$  に対して描かれた曲線が、グラフ左上方から低下して、中性子増倍率  $k$ （相対値）= 1.0 の線と交わる燃焼度、即ち、ペレット直径  $D_p$  に対応するバッチ燃焼度）から、ペレット直径  $D_p$  の増加に伴うサイクル燃焼度の低下割合に沿って、中性子増倍率  $k$ （相対値）を求めたものである。この中性子増倍率  $k$ （相対値）が 1.0 を上回ることは、ペレット直径  $D_p$  を増加した時に  $k$ （相対値）が 1.0 に至る燃焼度（図 8 の各ペレット直径ごとに描かれた曲線が、グラフ左上方から低下して、中性子増倍率  $k$ （相対値）= 1.0 の線と交わる燃焼度、即ち、各ペレット直径  $D_p$  に対応するバッチ燃焼度）が、サイクル燃焼度の低下割合で減じた燃焼度よりも高いことを意味しており、バッチ燃焼度の低下割合が、サイクル燃焼度の低下割合よりも小さいことを意味するにほかならない。

#### 【0043】

そのため、この中性子増倍率（相対値）が増加することは、燃料ペレットの太径化を進めた際のバッチ燃焼度  $B$  とサイクル燃焼度  $\beta$  の比（ $B / \beta$ ）が増加することと等価なものと考えられることができる。従って、燃料ペレットの直径の増加に対するサイクル燃焼度の低下割合は、上記数式から次第に緩やかなものとなる傾向を持つことがわかる。一方、図 1

10

20

30

40

50

0 は、図 8 のグラフを元にしてペレット直径に対するサイクル燃焼度及びバッチ燃焼度の低下割合を表すグラフである。バッチ燃焼度の変化は、この図 10 に示すように、燃料ペレットの直径の増加に対して次第にその変化量が増える傾向を持つことがわかる。これは燃料ペレットの直径の増加量が増えると、減速材量の減少が加速され、反応度に与える影響は増加する傾向を持つためである。この両者を比較すると、燃料ペレットの太径化の程度が図 10 に示す利得限界直径以下となる領域、即ち、太径化利得領域では、バッチ燃焼度の低下割合よりもサイクル燃焼度の低下割合の方が大きい、つまり、中性子増倍率が 1.0 以上となることわかる。

#### 【 0 0 4 4 】

図 11 は、燃料ペレットに対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフであり、特に、燃料ペレットの直径の最適領域を表すために図 9 のグラフの一部を拡大したグラフである。この図 11 のグラフに示すように、燃料ペレットの直径  $D_p$  が 8.19 mm より大きく、8.62 mm 以下の領域  $A_{17}$  で、バッチ燃焼度  $B$  とサイクル燃焼度は各々低下するものの、その比 ( $B / \quad$ ) は増加する。つまり、中性子増倍率の相対値が 1.0 を上回ることになり、この領域  $A_{17}$  で燃料ペレットの太径化によって取替燃料体数を低減できるというメリットを出せることができる。

#### 【 0 0 4 5 】

即ち、加圧水型原子炉 12 にて、燃料棒 51 が  $17 \times 17$  の正方格子状で、燃料集合体ピッチ  $P_1$  が 215 mm、燃料棒ピッチ  $P_2$  が 12.6 mm に配列された燃料集合体 40 において、燃料ペレット 61 の直径  $D_p$  を 8.19 mm より大きく、且つ、8.62 mm 以下に設定することで、この燃料ペレット 61 の直径を最適化することができ、従来の燃料集合体よりも中性子増倍率を向上させ、反応度を向上することができる。この場合、燃料ペレット 61 の直径  $D_p$  を、 $8.19 < D_p < 8.62$  mm 設定したが、最適値は、 $D_p = 8.40$  mm である。

#### 【 0 0 4 6 】

なお、 $17 \times 17$  形式の燃料集合体では、設計上、燃料集合体ピッチ  $P_1$  を 215 mm、燃料棒ピッチ  $P_2$  を 12.6 mm としたが、燃料集合体ピッチ  $P_1$  については、寸法公差を  $\pm 1$  mm 程度、燃料棒ピッチ  $P_2$  については、寸法公差を  $\pm 0.1$  mm 程度加味することが必要である。また、燃料ペレット 61 と燃料被覆管 62 との隙間  $G$  を 0.08 mm 程度とし、ジルコニウム合金製の燃料被覆管 62 の厚さを 0.57 mm 程度確保することが必要である。更に、燃料ペレット 61 の直径  $D_p$  の下限値を、8.19 mm より大きいものとしたが、寸法公差を考慮して 8.25 mm 以上とすることが望ましい。

#### 【 0 0 4 7 】

このように実施例 1 の原子炉によれば、ウラン酸化物を焼き固めた燃料ペレット 61 をジルコニウム合金製の燃料被覆管 62 に充填して燃料棒 51 を形成し、この燃料棒 51 を複数格子状に束ねて燃料集合体 40 を構成し、燃料集合体 40 からの発生熱量を一定とした場合、燃料ペレット 61 の外径が増加することで燃料集合体 40 に装荷されたウランの重量が増加し、それに伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、この燃料ペレット 61 の外径の増加によって起こる軽水（減速材）の量の減少による減速不足によって生じる反応度の低下分を上回る領域（太径化利得領域） $A_{17}$  を求め、この中性子増倍率が上回る領域  $A_{17}$  内で燃料ペレット 61 の直径を設定している。

#### 【 0 0 4 8 】

燃料ペレット 61 の外径を大きくすると、減速材としての軽水の量の減少により減速が悪化して反応度が低下するが、ウラン装荷量が増加して燃焼度が低下するために反応度が増加するものであり、この両者の関係において、燃料ペレット 61 の外径の増加に伴う燃料装荷量増加による反応度の増加分が、減速材の量の減少による減速不足による反応度の低下分を上回る領域  $A_{17}$  があり、この領域  $A_{17}$  内で燃料ペレット 61 の外径を設定することで、燃料ペレット 61 の直径が最適化され、反応度を増加させて炉心寿命を延長することができる。

#### 【 0 0 4 9 】

10

20

30

40

50

この場合、反応度が上回る領域  $A_{17}$  は、燃料ペレット 61 の外径の増加によってバッチ燃焼度が低下しても、その相対的な低下分を上回ってサイクル燃焼度を低下させる領域であり、この燃料ペレット 61 の直径の増加によるバッチ燃焼度の低下分を、サイクル燃焼度の低下分が上回る領域  $A_{17}$  は、燃料棒 51 の取替本数を減少させる領域であり、経済性を向上させることができる。

【0050】

具体的には、加圧水型原子炉 12 にて、燃料棒 51 が  $17 \times 17$  の格子状で、燃料集合体ピッチ  $P_1$  が  $215 \text{ mm}$ 、燃料棒ピッチ  $P_2$  が  $12.6 \text{ mm}$  に配列された燃料集合体 40 において、燃料ペレット 61 の直径  $D_p$  を  $8.19 \text{ mm}$  より大きく、且つ、 $8.62 \text{ mm}$  以下に設定している。従って、この燃料ペレット 61 の直径を最適化することができ、従来の燃料集合体よりも中性子増倍率を向上させ、反応度を向上させることができる。

10

【実施例 2】

【0051】

図 12 は、本発明の実施例 2 に係る加圧水型原子炉における  $15 \times 15$  型燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率を表すグラフ、図 13 は、燃料ペレット直径に対する中性子増倍率を表すグラフ、図 14 は、燃料ペレット直径の最適領域を表すグラフである。なお、前述した実施例で説明したものと同様の機能を有する部材には同一の符号を付して重複する説明は省略する。

【0052】

実施例 2 の加圧水型原子炉の燃料集合体は、燃料棒が  $15 \times 15$  の格子状で、燃料集合体ピッチ  $P_1$  が  $215 \text{ mm}$ 、燃料棒ピッチ  $P_2$  が  $14.3 \text{ mm}$  に配列されたものである。そして、本実施例では、前述した実施例 1 と同様に、燃料ペレットを太径化した特定の領域では、燃料集合体のバッチ燃焼度の低下割合よりもサイクル燃焼度の低下割合の方が大きい、つまり、中性子増倍率が向上するものであり、この領域で燃料集合体を設計するようにしている。

20

【0053】

図 12 は、 $15 \times 15$  形式の燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフであり、燃料ペレットの直径  $D_p$  を  $9.29 \text{ mm} \sim 11.29 \text{ mm}$  まで変化させたときの中性子増倍率の変化割合を表している。なお、上述した従来の燃料集合体の設計方法で設定した燃料ペレットの直径  $D_p$  は  $9.29 \text{ mm}$  であり、 $4.8 \text{ wt} \% 15 \times 15$  型燃料のバッチ燃焼度  $B = 33100 \text{ MWd} / \text{t}$  であることから、燃料ペレットの直径  $D_p = 9.29 \text{ mm}$  にて、集合体燃焼度  $B$  は  $33100 \text{ MWd} / \text{t}$  のときの中性子増倍率  $k$ （相対値）を  $1.0$  と設定している。また、燃料ペレットの直径  $D_p$  を変化させたとしても、燃料被覆管との隙間  $G$  と燃料被覆管の厚さ  $T$  は変化しないものとして考える。

30

【0054】

従って、図 12 のグラフに示すように、燃焼期間（集合体燃焼度）の増加によって中性子増倍率  $k$ （反応度）は低下し、また、燃料ペレットの直径  $D_p$  を増加させると減速材量が減少するために中性子増倍率は低下する。バッチ燃焼度は、炉心を臨界にちょうど維持するために必要な反応度（中性子増倍率）を与える点であり、ペレット径を太くしても  $k$  を評価する燃焼度をペレット径が  $9.29 \text{ mm}$  のときのバッチ燃焼度（ $B = 33100 \text{ MWd} / \text{t}$ ）に固定すると、燃料ペレットの太径化によって中性子増倍率は単調に低下（図 12 のグラフの印）する。この場合は、ペレット径を太径化しても燃焼度が同一になるようにサイクル長さを延長させたことになる。一方、サイクル長さを固定して考えた場合、燃料ペレットの太径化に伴うウラン重量の増加によってサイクル燃焼度は低下（図 12 のグラフの印）する。即ち、燃料ペレットを太径化してその直径  $D_p$  を燃料棒全長にわたって  $D_0$  から  $D_1$  に変更した場合、前述した実施例 1 で説明したように、燃料ペレットの太径化によってサイクル燃焼度は低下する。

40

【0055】

また、図 13 は、燃料ペレットに対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフであり、この中性子増倍率（相対値）が増加することは、燃料ペレットの太径化を進めた際のバツ

50

ち燃焼度  $B$  とサイクル燃焼度 の比 ( $B /$  ) が増加することと等価なものと考えることができる。従って、前述した実施例 1 で説明したように、燃料ペレットの直径の増加に対するサイクル燃焼度の低下割合は、次第に緩やかなものとなる傾向を持つことがわかる。一方、バッチ燃焼度の変化は、前述した実施例 1 と同様に、燃料ペレットの直径の増加に対して次第にその変化量が増える傾向を持つことがわかる。これは燃料ペレットの直径の増加量が増えると、減速材量の減少が加速され、反応度に与える影響は増加する傾向を持つためである。この両者を比較すると、燃料ペレットの太径化の程度が僅かな領域では、バッチ燃焼度の低下割合よりもサイクル燃焼度の低下割合の方が大きい、つまり、中性子増倍率が 1.0 以上となるものと考えることができる。

【0056】

10

図 14 は、燃料ペレットの直径に対する中性子増倍率 (相対値) を表すグラフであり、特に、燃料ペレットの直径の最適領域を表すために図 13 のグラフを拡大したグラフである。この図 14 のグラフに示すように、燃料ペレットの直径  $D_p$  が 9.29 mm より大きく、10.11 mm 以下の領域  $A_{15}$  で、バッチ燃焼度  $B$  とサイクル燃焼度 は各々低下するものの、その比 ( $B /$  ) は増加する。つまり、中性子増倍率の相対値が 1.0 を上回ることになり、この領域  $A_{15}$  で燃料ペレットの太径化によって取替燃料体数を低減できるというメリットを出せる。

【0057】

即ち、加圧水型原子炉にて、燃料棒が  $15 \times 15$  の正方格子状で、燃料集合体ピッチ  $P_1$  が 215 mm、燃料棒ピッチ  $P_2$  が 14.3 mm に配列された燃料集合体において、燃料ペレットの直径  $D_p$  を 9.29 mm より大きく、且つ、10.11 mm 以下に設定することで、この燃料ペレットの直径を最適化することができ、従来の燃料集合体よりも中性子増倍率を向上させ、反応度を増加させることができる。この場合、燃料ペレットの直径  $D_p$  mm を、 $9.29 < D_p < 10.11$  mm に設定したが、最適値は、 $D_p = 9.69$  mm である。

20

【0058】

なお、 $15 \times 15$  形式の燃料集合体では、設計上、燃料集合体ピッチ  $P_1$  を 215 mm、燃料棒ピッチ  $P_2$  を 14.3 mm としたが、燃料集合体ピッチ  $P_1$  については、寸法公差を  $\pm 1$  mm 程度、燃料棒ピッチ  $P_2$  については、寸法公差を  $\pm 0.1$  mm 程度加味することが必要である。また、燃料ペレットと燃料被覆管との隙間  $G$  を 0.09 mm 程度とし、ジルコニウム合金製の燃料被覆管の厚さを 0.62 mm 程度確保することが必要である。更に、燃料ペレットの直径  $D_p$  の下限値を、9.29 mm より大きいものとしたが、寸法公差を考慮して 9.35 mm 以上とすることが望ましい。

30

【0059】

このように実施例 2 の原子炉によれば、加圧水型原子炉にて、燃料棒が  $15 \times 15$  の格子状で、燃料集合体ピッチ  $P_1$  が 215 mm、燃料棒ピッチ  $P_2$  が 14.3 mm に配列された燃料集合体において、燃料集合体からの発生熱量を一定とした場合、燃料ペレットの外径が増加することで燃料集合体に装荷されたウランの重量が増加し、それに伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、この燃料ペレットの外径の増加によって起こる軽水 (減速材) の量の減少による減速不足によって生じる反応度の不足分を上回る領域 (太径化利得領域)  $A_{15}$  として、燃料ペレットの直径  $D_p$  を 9.29 mm より大きく、且つ、10.11 mm 以下に設定している。従って、この燃料ペレットの直径を最適化することができ、従来の燃料集合体よりも中性子増倍率を増加させ、反応度を増加させることができる。

40

【実施例 3】

【0060】

図 15 は、本発明の実施例 3 に係る加圧水型原子炉における  $14 \times 14$  型燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率を表すグラフ、図 16 は、燃料ペレット直径に対する中性子増倍率を表すグラフ、図 17 は、燃料ペレット直径の最適領域を表すグラフである。なお、前述した実施例で説明したものと同様の機能を有する部材には同一の符号を付して重複する説明は省略する。

50

## 【 0 0 6 1 】

実施例 3 の加圧水型原子炉の燃料集合体は、燃料棒が  $14 \times 14$  の正方格子状で、燃料集合体ピッチ  $P_1$  が  $198 \text{ mm}$ 、燃料棒ピッチ  $P_2$  が  $14.1 \text{ mm}$  に配列されたものである。そして、本実施例では、前述した実施例 1 と同様に、燃料ペレットを太径化した特定の領域では、燃料集合体のバッチ燃焼度の低下割合よりもサイクル燃焼度の低下割合の方が大きい、つまり、中性子増倍率が向上するものであり、この領域で燃料集合体を設計するようにしている。

## 【 0 0 6 2 】

図 15 は、 $14 \times 14$  形式の燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフであり、燃料ペレットの直径  $D_p$  を  $9.29 \text{ mm} \sim 11.29 \text{ mm}$  まで変化させたときの中性子増倍率の変化割合を表している。なお、上述した従来の燃料集合体の設計方法で設定した燃料ペレットの直径  $D_p$  は  $9.29 \text{ mm}$  であり、 $4.8 \text{ wt} \% 14 \times 14$  型燃料のバッチ燃焼度  $B$  は  $32000 \text{ MWd} / \text{t}$  であることから、燃料ペレットの直径  $D_p = 9.29 \text{ mm}$  にて、集合体燃焼度  $B = 32000 \text{ MWd} / \text{t}$  のときの中性子増倍率  $k$ （相対値）を  $1.0$  と設定している。また、燃料ペレットの直径  $D_p$  を変化させたとしても、燃料被覆管との隙間  $G$  と燃料被覆管の厚さ  $T$  は変化しないものとして考える。

## 【 0 0 6 3 】

従って、図 15 のグラフに示すように、燃焼期間（集合体燃焼度）の増加によって中性子増倍率  $k$ （反応度）は低下し、また、燃料ペレットの直径  $D_p$  を増加させると減速材量が減少するために中性子増倍率は低下する。バッチ燃焼度は、炉心を臨界にちょうど維持するために必要な反応度（中性子増倍率）を与える点であり、ペレット径を太くしても  $k$  を評価する燃焼度をペレット径が  $9.29 \text{ mm}$  のときのバッチ燃焼度（ $B = 32000 \text{ MWd} / \text{t}$ ）に固定すると、燃料ペレットの太径化によって中性子増倍率は単調に低下（図 15 のグラフの印）する。この場合は、ペレット径を太径化しても燃焼度が同一になるようにサイクル長さを延長させたことになる。一方、サイクル長さを固定して考えた場合、燃料ペレットの太径化に伴うウラン重量の増加によってサイクル燃焼度は低下（図 15 のグラフの印）する。即ち、燃料ペレットを太径化してその直径  $D_p$  を燃料棒全長にわたって  $D_0$  から  $D_1$  に変更した場合、前述した実施例 1 と同様に、燃料ペレットの太径化によってサイクル燃焼度は低下する。

## 【 0 0 6 4 】

また、図 16 は、燃料ペレットの直径に対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフであり、この中性子増倍率（相対値）が増加することは、燃料ペレットの太径化を進めた際のバッチ燃焼度  $B$  とサイクル燃焼度の比（ $B /$ ）が増加することと等価なものと考えることができる。従って、前述した実施例 1 と同様に、燃料ペレットの直径の増加に対するサイクル燃焼度の低下割合は、次第に緩やかなものとなる傾向を持つことがわかる。一方、バッチ燃焼度の変化は、前述した実施例 1 と同様に、燃料ペレットの直径の増加に対して次第にその変化量が増える傾向を持つことがわかる。これは燃料ペレットの直径の増加量が増え、減速材量の減少が加速され、反応度に与える影響は増加する傾向を持つためである。この両者を比較すると、燃料ペレットの太径化の程度が僅かな領域では、バッチ燃焼度の低下割合よりもサイクル燃焼度の低下割合の方が大きい、つまり、中性子増倍率が  $1.0$  以上となるものと考えることができる。

## 【 0 0 6 5 】

図 17 は、燃料ペレットの直径に対する中性子増倍率（相対値）を表すグラフであり、特に、燃料ペレットの直径の最適領域を表すために図 16 のグラフを拡大したグラフである。この図 17 のグラフに示すように、燃料ペレットの直径  $D_p$  が  $9.29 \text{ mm}$  より大きく、 $9.64 \text{ mm}$  以下の領域  $A_{14}$  で、バッチ燃焼度  $B$  とサイクル燃焼度は各々低下するものの、その比（ $B /$ ）は増加する。つまり、中性子増倍率の相対値が  $1.0$  を上回ることになり、この領域  $A_{14}$  で燃料ペレットの太径化によって取替燃料体数を低減できるというメリットを出せる。

## 【 0 0 6 6 】

10

20

30

40

50

即ち、加圧水型原子炉にて、燃料棒が $14 \times 14$ の正方格子状で、燃料集合体ピッチ $P_1$ が $198 \text{ mm}$ 、燃料棒ピッチ $P_2$ が $14.1 \text{ mm}$ に配列された燃料集合体において、燃料ペレットの直径 $D_p$ を $9.29 \text{ mm}$ より大きく、且つ、 $9.64 \text{ mm}$ 以下に設定することで、この燃料ペレットの直径を最適化することができ、従来の燃料集合体よりも中性子増倍率を増加させ、反応度を増加させることができる。この場合、燃料ペレットの直径 $D_p$ を、 $9.29 < D_p < 9.64 \text{ mm}$ に設定したが、最適値は、 $D_p = 9.47 \text{ mm}$ である。

【0067】

なお、 $14 \times 14$ 形式の燃料集合体では、設計上、燃料集合体ピッチ $P_1$ を $198 \text{ mm}$ 、燃料棒ピッチ $P_2$ を $14.1 \text{ mm}$ としたが、燃料集合体ピッチ $P_1$ については、寸法公差を $\pm 1 \text{ mm}$ 程度、燃料棒ピッチ $P_2$ については、寸法公差を $\pm 0.1 \text{ mm}$ 程度加味することが必要である。また、燃料ペレットと燃料被覆管との隙間 $G$ を $0.09 \text{ mm}$ 程度とし、ジルコニウム合金製の燃料被覆管の厚さを $0.62 \text{ mm}$ 程度確保することが必要である。更に、燃料ペレットの直径 $D_1$ の下限値を、 $9.29 \text{ mm}$ より大きいものとしたが、寸法公差を考慮して $9.35 \text{ mm}$ 以上とすることが望ましい。

【0068】

このように実施例3の原子炉によれば、加圧水型原子炉にて、燃料棒が $14 \times 14$ の格子状で、燃料集合体ピッチ $P_1$ が $198 \text{ mm}$ 、燃料棒ピッチ $P_2$ が $14.1 \text{ mm}$ に配列された燃料集合体において、燃料集合体からの発生熱量を一定とした場合、燃料ペレットの外径が増加することで燃料集合体に装荷されたウランの重量が増加し、それに伴う燃焼度の低下による反応度の増加分が、この燃料ペレットの外径の増加によって起こる軽水（減速材）の量の減少による減速不足によって生じる反応度の不足分を上回る領域（太径化利得領域） $A_{14}$ として、燃料ペレットの直径 $D_p$ を $9.29 \text{ mm}$ より大きく、且つ、 $9.64 \text{ mm}$ 以下に設定している。従って、この燃料ペレットの直径を最適化することができ、従来の燃料集合体よりも中性子増倍率を向上させ、反応度を向上することができる。

【産業上の利用可能性】

【0069】

本発明に係る加圧水型原子炉の燃料集合体及び燃料集合体の設計方法は、燃料ペレット61の外径を増加することで反応度が向上する領域を求め燃料ペレットの直径の最適化を図るにものであり、いずれの種類の加圧水型原子炉の燃料集合体やその設計方法にも適用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0070】

【図1】本発明の実施例1に係る加圧水型原子炉を有する発電設備の概略構成図である。

【図2】実施例1の加圧水型原子炉の内部構造を表す概略構成図である。

【図3】加圧水型原子炉の炉心構造を表す概略図である。

【図4】実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体の概略構成図である。

【図5】実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体における配列構成を表す概略断面図である。

【図6】実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体における燃料棒の一部断面図である。

【図7】実施例1の加圧水型原子炉の燃料集合体における燃料棒の詳細を表す要部断面図である。

【図8】 $17 \times 17$ 型燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率を表すグラフである。

【図9】燃料ペレット直径に対する中性子増倍率を表すグラフである。

【図10】燃料ペレット直径に対するサイクル燃焼度及びバッチ燃焼度の低下割合を表すグラフである。

【図11】燃料ペレット直径の最適領域を表すグラフである。

【図12】本発明の実施例2に係る加圧水型原子炉における $15 \times 15$ 型燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率を表すグラフである。

【図13】燃料ペレット直径に対する中性子増倍率を表すグラフである。

10

20

30

40

50

【図14】燃料ペレット直径の最適領域を表すグラフである。

【図15】本発明の実施例3に係る加圧水型原子炉における14×14型燃料集合体の燃焼度に対する中性子増倍率を表すグラフである。

【図16】燃料ペレット直径に対する中性子増倍率を表すグラフである。

【図17】燃料ペレット直径の最適領域を表すグラフである。

【符号の説明】

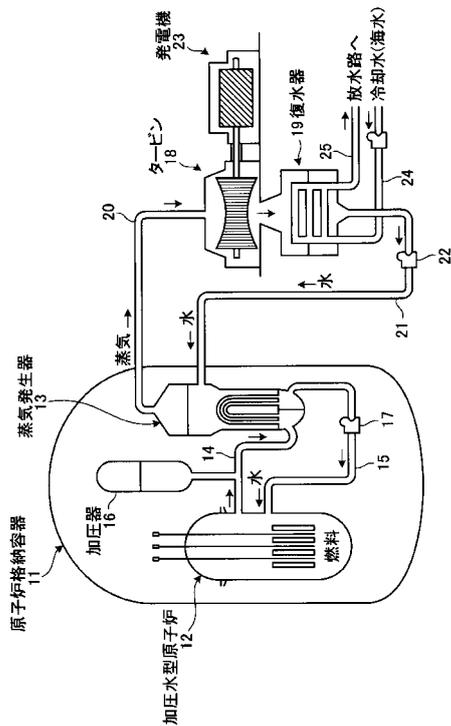
【0071】

- 12 加圧水型原子炉
- 31 原子炉容器
- 39 炉心
- 40 燃料集合体
- 45 制御棒駆動装置
- 47 制御棒（制御棒クラスタ）
- 49 炉内計装用シンプル
- 51 燃料棒
- 55 制御棒案内管
- 56 シンプル案内管
- 61 燃料棒
- 62 燃料被覆管
- D<sub>p</sub> 燃料ペレット直径
- D<sub>r</sub> 燃料被覆管外径

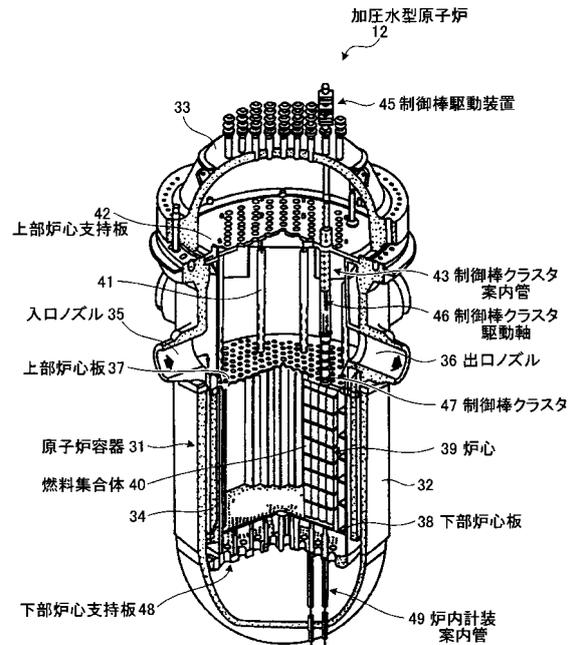
10

20

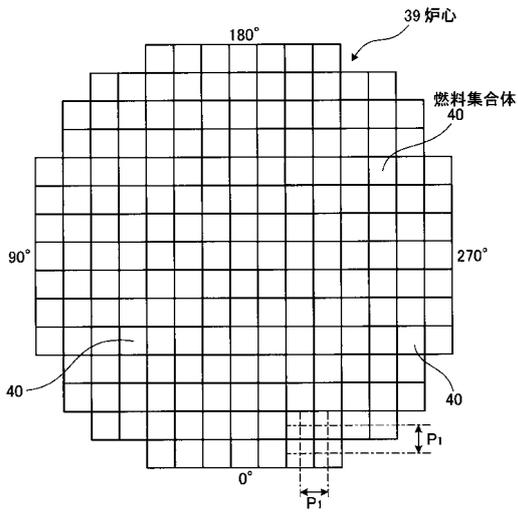
【図1】



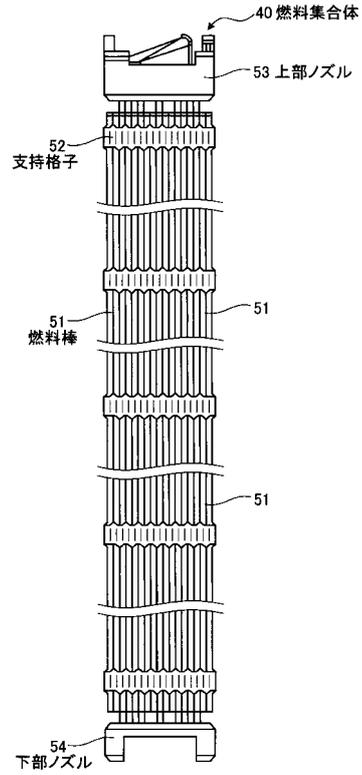
【図2】



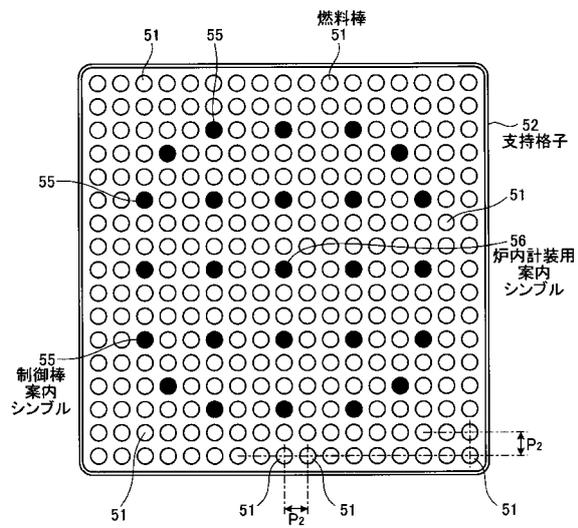
【図3】



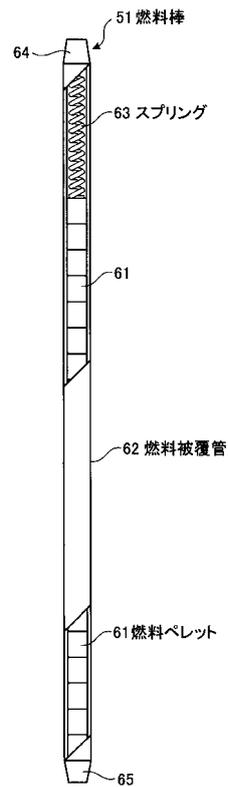
【図4】



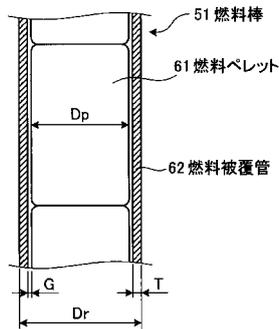
【図5】



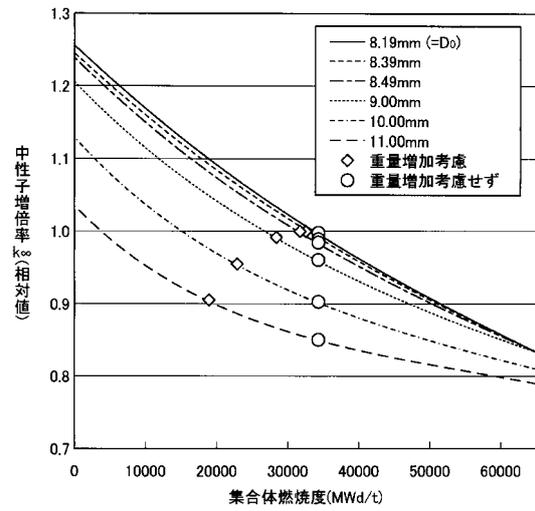
【図6】



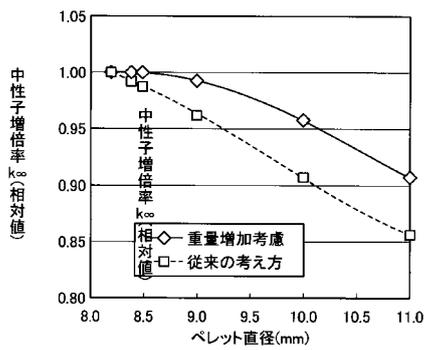
【 図 7 】



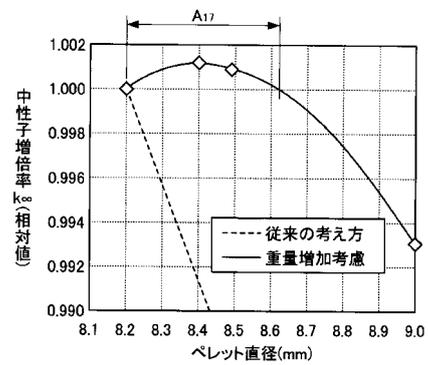
【 図 8 】



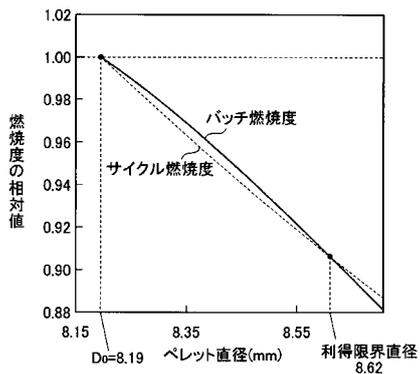
【 図 9 】



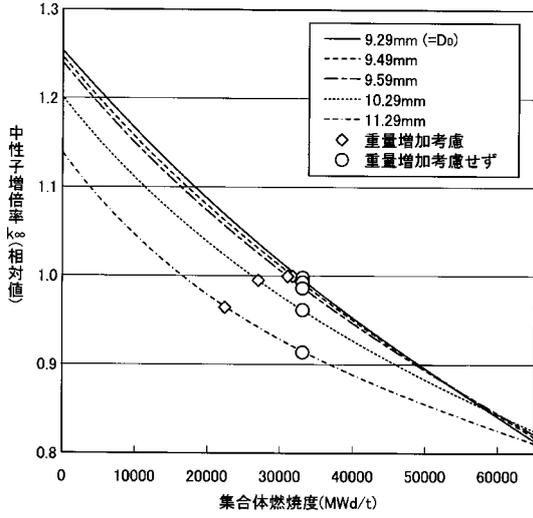
【 図 1 1 】



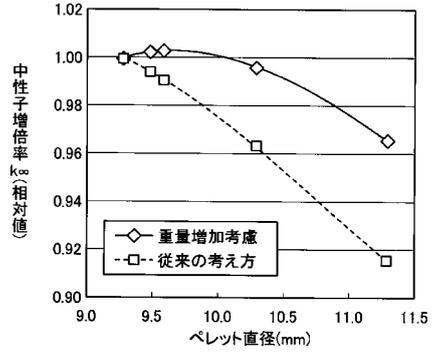
【 図 1 0 】



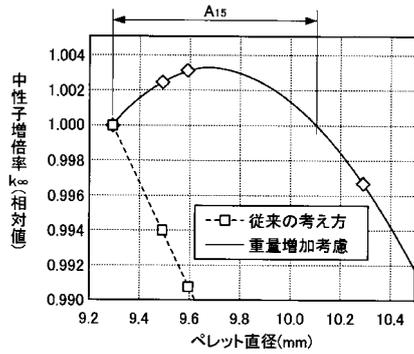
【図 1 2】



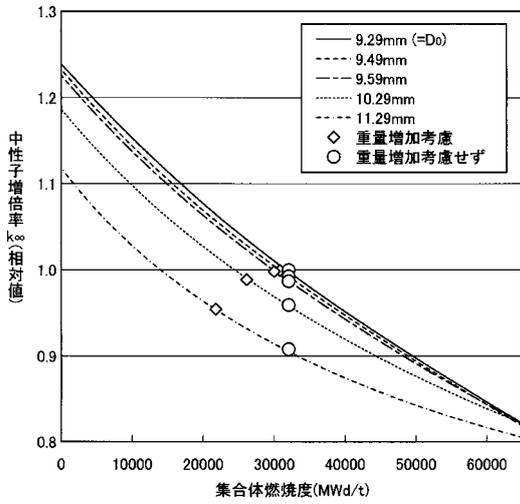
【図 1 3】



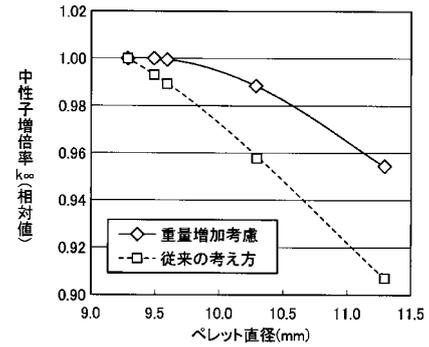
【図 1 4】



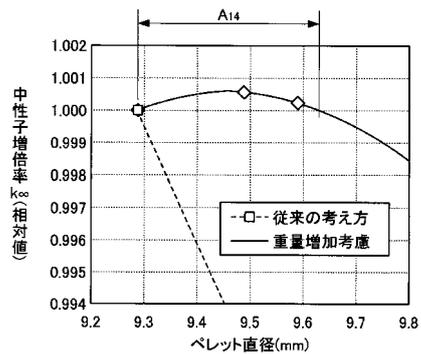
【図 1 5】



【図 1 6】



【図 1 7】



---

フロントページの続き

審査官 中塚 直樹

(56)参考文献 特開平02 - 201190 (JP, A)  
特開平05 - 273369 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G21C 3/28  
G21C 3/328