(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第5355870号
(P5355870)
(45)発行日　平成25年11月27日(2013.11.27)　(24)登録日　平成25年9月6日(2013.9.6)

(51)Int.Cl.　F I
G21C 5/18 (2006.01)　G21C 5/18 GDB

請求項の数 13 (全 15 頁)

(21)出願番号　特願2007-203456(P2007-203456)
(22)出願日　平成19年8月3日(2007.8.3)
(65)公開番号　特開2009-36729(P2009-36729A)
(43)公開日　平成21年2月19日(2009.2.19)
審査請求日　平成22年7月9日(2010.7.9)

(73)特許権者　000229461
株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
神奈川県横須賀市内川二丁目３番１号
(74)代理人　100075812
弁理士　吉武　賢次
(74)代理人　100091982
弁理士　永井　浩之
(74)代理人　100096895
弁理士　岡田　淳平
(74)代理人　100117787
弁理士　勝沼　宏仁

最終頁に続く

(54)【発明の名称】原子炉の炉心

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
核分裂性物質を装填した燃料棒と、可燃性毒物を添加した核分裂性物質を装填した可燃性毒物含有燃料棒を束ねてなる原子炉用燃料集合体を装荷した原子炉の炉心において、
可燃性毒物含有燃料棒の本数および可燃性毒物濃度の組合せが燃料集合体群の種類によって異なる燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）を有し、
前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）は、ガドリニア濃度が、燃料集合体群１＜燃料集合体群２＜・・・＜燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、
可燃性毒物含有燃料棒の本数が、燃料集合体群１＞燃料集合体群２＞・・・＞燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、
前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の燃料集合体は、軸方向下方ほど可燃性毒物濃度が高く構成され、可燃性毒物濃度が高い燃料集合体ほど、軸方向の可燃性毒物濃度の差が大きく、
ペレット密度の中央値が９６．６％理論密度以上である、
ことを特徴とする長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項２】
前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、
前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなく

なる可燃性毒物を有し、
前記燃料集合体群１は、前記燃料集合体群２よりも短い運転期間で毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、
燃料集合体群３は、前記燃料集合体群２よりも長い運転期間で毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有する、
ことを特徴とする請求項１に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項３】
前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、
前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、
前記燃料集合体群３は、前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２の可燃性毒物濃度より低い濃度の可燃性毒物を有する、
ことを特徴とする請求項１に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項４】
前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、
前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、
前記燃料集合体群３は、前記燃料集合体群１の可燃性毒物含有燃料棒の本数と前記燃料集合体群２の可燃性毒物含有燃料棒の本数との間の本数の可燃性毒物含有燃料棒を有する、
ことを特徴とする請求項１に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項５】
前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の各燃料集合体群の燃料集合体の可燃性毒物含有燃料棒の本数の割合β（％）は、設計運転期間をα（月）とすると、
（－４／９×α＋２３）≦β≦（－４／９×α＋２６）
であることを特徴とする請求項１に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項６】
燃料棒のヘリウムの初期封入圧が１．０（ＭＰａ）未満であることを特徴とする請求項５に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項７】
核分裂性物質を装填した燃料棒と、可燃性毒物を添加した核分裂性物質を装填した可燃性毒物含有燃料棒を束ねてなる原子炉用燃料集合体を装荷した原子炉の炉心において、
可燃性毒物含有燃料棒の本数および可燃性毒物濃度の組合せが燃料集合体群の種類によって異なる燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）を有し、
前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）は、ガドリニア濃度が、燃料集合体群１＜燃料集合体群２＜・・・＜燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、
可燃性毒物含有燃料棒の本数が、燃料集合体群１＞燃料集合体群２＞・・・＞燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、
前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の燃料集合体は、可燃性毒物入りペレットが燃料棒の全長の８５％以内の範囲にのみ装填された燃料棒を有し、可燃性毒物濃度が高い燃料集合体ほど前記燃料棒を多く含む、
ことを特徴とする長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項８】
前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、
前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、
前記燃料集合体群１は、前記燃料集合体群２よりも短い運転期間で毒物効果がほぼなく

なる可燃性毒物を有し、
燃料集合体群３は、前記燃料集合体群２よりも長い運転期間で毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有する、
ことを特徴とする請求項７に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項９】
前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、
前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、
前記燃料集合体群３は、前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２の可燃性毒物濃度より低い濃度の可燃性毒物を有する、
ことを特徴とする請求項７に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項１０】
前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、
前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、
前記燃料集合体群３は、前記燃料集合体群１の可燃性毒物含有燃料棒の本数と前記燃料集合体群２の可燃性毒物含有燃料棒の本数との間の本数の可燃性毒物含有燃料棒を有する、
ことを特徴とする請求項７に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項１１】
前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の各燃料集合体群の燃料集合体の可燃性毒物含有燃料棒の本数の割合β（％）は、設計運転期間をα（月）とすると、
（－４／９×α＋２３）≦β≦（－４／９×α＋２６）
であることを特徴とする請求項７に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項１２】
ペレット密度の中央値が９６．６％理論密度以上であることを特徴とする請求項１１に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【請求項１３】
燃料棒のヘリウムの初期封入圧が１．０（ＭＰａ）未満であることを特徴とする請求項１２に記載の長期運転サイクルに適した原子炉の炉心。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、沸騰水型原子炉（以下、ＢＷＲと略す）の炉心に関する。
【０００２】
特に、長期間の運転サイクルのＢＷＲの炉心に対して、運転サイクル初期の余剰反応度を適切に制御でき、かつ、運転サイクル全体を通して余剰反応度を適切に調整できるＢＷＲの炉心に関する。
【背景技術】
【０００３】
原子炉は、中性子が核分裂性物質に吸収されて核分裂が起こり、その際にエネルギーとともに放出される中性子が次の核分裂を引き起こすという連鎖反応により、エネルギーを出し続ける。
【０００４】
この連鎖反応が平衡にある状態を臨界といい、一定の出力で運転される原子炉はこの臨界の状態を保ち続けている。
【０００５】
また、連鎖反応が増大していく状態を臨界超過といい、逆に減少していく状態を未臨界という。

【０００６】
原子炉は一定の期間にわたって燃料の補給なしに運転し続けねばならないために、炉心内には臨界維持に必要な量よりも多い核分裂性物質が装荷されている。このため、原子炉は制御材なしには臨界超過になり、この超過した反応度を余剰反応度という。原子炉の運転において、この余剰反応度を運転期間を通じて適切に制御することが重要になる。
【０００７】
余剰反応度を原子炉の運転期間を通じて制御する技術としては、可燃性毒物を燃料中に混入することがよく知られている。ここで、可燃性毒物とは、大きい中性子吸収断面積を有して中性子を吸収し、運転期間を通じて徐々に燃焼しその物質量が減少していく中性子吸収材のことである。核燃料物質に混ぜて使用される可燃性毒物としてガドリニアなどが知られている。
【０００８】
従来のガドリニアを核燃料物質に混ぜた燃料棒を有する燃料集合体群の例を図９に示す。
【０００９】
従来のガドリニアを利用した炉心は、核燃料物質に混ぜたガドリニア含有燃料棒の種類は同じでその本数のみが異なる二つの燃料集合体群を用意し、これらの燃料集合体群の燃料集合体を適宜炉心に配置するというものである。
【００１０】
可燃性毒物の効果、すなわち可燃性毒物の反応度抑制の様子を、図１０を用いて説明する。
【００１１】
図１０は、可燃性毒物の一種であるガドリニアを混入した燃料集合体の無限増倍率の燃焼度変化の一例を示す。
【００１２】
ここで、無限増倍率とは、理論的に無限大の体系における単位時間あたりの中性子発生数と単位時間あたりの中性子消滅数の比率をいう。
【００１３】
図１０に示すように、可燃性毒物が混入している燃料棒の本数が増加すれば、燃焼初期での無限増倍率が低下する。混入する可燃性毒物の濃度を増加させれば、可燃性毒物の燃え尽きる時期を遅らせることができ、その結果無限増倍率の最大値を抑えることが可能になる。
【００１４】
この効果を用いることで、可燃性毒物の混入濃度とそれが混入した燃料棒の本数の組み合わせにより、運転サイクル初期の余剰反応度を適切に制御することが可能となる。
【００１５】
可燃性毒物の量は所定の運転サイクル長さに応じて最適化される。
【００１６】
想定している運転サイクル長さよりも運転期間が短い場合には可燃性毒物が運転サイクル末期においても残留し、運転サイクル末期の反応度ロスを生じて、経済性上好ましくない。
【００１７】
逆に想定している運転サイクル長さよりも運転期間が長い場合にはサイクル途中で可燃性毒物が燃え尽き、その後余剰反応度が高すぎるようになる。余剰反応度が高すぎると、制御棒の抽挿に対して原子炉の出力が敏感に上下し、熱的特性が悪化するなどの影響が生じる。
【００１８】
運転サイクルの長さは、定期検査の長さや電力需要などの諸条件により変動するが、原子炉の炉心の設計としては運転サイクルの長さが変動しても、運転サイクルの長さに応じて最適に可燃性毒物を過不足無く燃焼することができるようにするのが好ましい。

【００１９】
このような課題を解決するために、特公平7-92513においては、可燃性毒物入り燃料棒本数が多くかつ可燃性毒物濃度の低い燃料集合体と、可燃性毒物入り燃料棒本数が少なくかつ可燃性毒物濃度の高い燃料集合体とを具備する原子炉の炉心が提案されている。
【００２０】
特公平7-92513が提案する炉心は、１２ヶ月から１６ヶ月程度の原子炉の運転期間を対象とし、特公平7-92513によれば、上記程度の運転期間に対してある程度運転サイクル長さが変動しても、余剰反応度を適切に調整できるとしている。
【特許文献１】特公平７－９２５１３号公報
【特許文献２】特開平６－３４７５７８号公報
【特許文献３】特開平７－１２８４７３号公報
【特許文献４】特開平７－２０９４６０号公報
【特許文献５】特開平８－２４０６７６号公報
【特許文献６】特開平９－２１１１６５号公報
【特許文献７】特開平１１－１３３１７８号公報
【特許文献８】特開平１１－１７４１７８号公報
【特許文献９】特開２００２－１８１９７３号公報
【特許文献１０】特開２００４－２０４６３号公報
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】
【００２１】
上述したように特公平7-92513が提案する炉心は、原子炉の運転期間として１２ヶ月から１６ヶ月程度を想定しているが、最近の原子炉の運転サイクルの期間は最大２４ヶ月までを考慮する必要があるようになってきている。
【００２２】
特公平7-92513が提案する技術によって、１６ヶ月を超えて最大２４ヶ月の長期間の運転サイクルに対応しようとすると、可燃性毒物入り燃料棒本数が多くかつ可燃性毒物濃度の低い燃料集合体と、可燃性毒物入り燃料棒本数が少なくかつ可燃性毒物濃度の高い燃料集合体の可燃性毒物の濃度差は非常に大きくなる。
【００２３】
ところで、運転期間は変動する可能性があるため、その融通性を確保するために平衡炉心において、可燃性毒物入り燃料棒本数の多い燃料集合体と少ない燃料集合体の体数を調整することで、サイクル初期の余剰反応度を１%△k程度、変化させられることが必要である。
【００２４】
しかし、特公平7-92513の技術を長期運転に適用すると可燃性毒物濃度差が大きくなり、サイクル初期の余剰反応度を高くするために、可燃性毒物濃度の高く、可燃性毒物入り燃料棒本数の少ない燃料集合体を増やすと、可燃性毒物の燃え残りのために、かえってサイクル初期の余剰反応度が低下することになる。
【００２５】
このように可燃性毒物濃度や可燃性毒物入り燃料棒本数の異なる燃料集合体を２種類具備する従来の取替燃料集合体では、長期運転期間に対して、適切な融通性を有した炉心を提供することができない。
【００２６】
本発明は上記事情に鑑みてなされたもので、その目的は、サイクル初期の余剰反応度を確保しつつ幅広い運転サイクル長さの変動に対して余剰反応度を適切に制御できる燃料集合体を提供することである。
【００２７】
なお、設計運転期間が変動することへの融通性は、取替炉心の特有の問題である。
【００２８】

特開平6－347578では、初装荷炉心用に可燃性毒物入り燃料棒本数の異なる炉心に関する技術が開示されているが、初装荷炉心では設計運転期間の変動は考慮する必要はなく、発明の目的とする課題は全く別である。

【課題を解決するための手段】

【００２９】

本願発明による長期運転サイクルに適した原子炉の炉心は、

核分裂性物質を装填した燃料棒と、可燃性毒物を添加した核分裂性物質を装填した可燃性毒物含有燃料棒を束ねてなる原子炉用燃料集合体を装荷した原子炉の炉心において、

可燃性毒物含有燃料棒の本数および可燃性毒物濃度の組合せが燃料集合体群の種類によって異なる燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）を有し、

前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）は、ガドリニア濃度が、燃料集合体群１＜燃料集合体群２＜・・・＜燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、

可燃性毒物含有燃料棒の本数が、燃料集合体群１＞燃料集合体群２＞・・・＞燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、

前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の燃料集合体は、軸方向下方ほど可燃性毒物濃度が高く構成され、可燃性毒物濃度が高い燃料集合体ほど、軸方向の可燃性毒物濃度の差が大きく、

ペレット密度の中央値が９６．６％理論密度以上である、

ことを特徴とする。

【００３３】

前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、

前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、

前記燃料集合体群１は、前記燃料集合体群２よりも短い運転期間で毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、

燃料集合体群３は、前記燃料集合体群２よりも長い運転期間で毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有するようにすることができる。

【００３４】

前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、

前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、

前記燃料集合体群３は、前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２の可燃性毒物濃度より低い濃度の可燃性毒物を有するようにすることができる。

【００３５】

前記燃料集合体群の数（ｎ）は３であり、

前記燃料集合体群１および前記燃料集合体群２は、設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる可燃性毒物を有し、

前記燃料集合体群３は、前記燃料集合体群１の可燃性毒物含有燃料棒の本数と前記燃料集合体群２の可燃性毒物含有燃料棒の本数との間の本数の可燃性毒物含有燃料棒を有するようにすることができる。

【００３８】

本願発明による長期運転サイクルに適した原子炉の炉心は、

核分裂性物質を装填した燃料棒と、可燃性毒物を添加した核分裂性物質を装填した可燃性毒物含有燃料棒を束ねてなる原子炉用燃料集合体を装荷した原子炉の炉心において、

可燃性毒物含有燃料棒の本数および可燃性毒物濃度の組合せが燃料集合体群の種類によって異なる燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）を有し、

前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）は、ガドリ

ニア濃度が、燃料集合体群１＜燃料集合体群２＜・・・＜燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、
可燃性毒物含有燃料棒の本数が、燃料集合体群１＞燃料集合体群２＞・・・＞燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）であり、
前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の燃料集合体は、可燃性毒物入りペレットが燃料棒の全長の８５％以内の範囲にのみ装填された燃料棒を有し、可燃性毒物濃度が高い燃料集合体ほど前記燃料棒を多く含む、
ことを特徴とする。

【００４１】

前記燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の各燃料集合体群の燃料集合体の可燃性毒物含有燃料棒の本数の割合β（％）は、設計運転期間をα（月）とすると、
（－４／９×α＋２３）≦β≦（－４／９×α＋２６）
であるようにすることができる。

【００４２】

ペレット密度の中央値が９６．６％理論密度以上であるようにすることができる。

【００４３】

燃料棒のヘリウムの初期封入圧が１．０（ＭＰａ）未満であるようにすることができる。

【発明の効果】

【００４６】

本発明の原子炉の炉心によれば、可燃性毒物の濃度あるいは可燃性毒物含有燃料棒の本数あるいはその双方が異なる燃料集合体を有する３種類以上の燃料集合体群を有し、燃料集合体群間の可燃性毒物の濃度の差を小さく設けることができる。それによって極めて幅の広い運転サイクル長さに対して余剰反応度を適切に制御でき、１６ヶ月以上の長期運転に対しても、安全性及び経済性を向上させた原子炉の炉心を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【００４７】

以下、本発明の好ましい実施の形態を記載する。

【００４８】

［第１の実施形態］

図１は本発明の一実施形態による原子炉の炉心を構成する燃料集合体群の例を示すものである。

【００４９】

図１において、数値の列はウラン濃縮度、ガドリニア含有燃料棒の本数、ガドリニアの濃度を示している。数値の行は、燃料集合体の軸方向のウラン濃縮度、ガドリニア含有燃料棒の本数、ガドリニアの濃度の分布を示している。なお、本実施形態の原子炉は764体の燃料集合体が装荷されている。なお、ここには示していないが、燃料集合体内には複数種類のガドリニア入り燃料棒が装填されており、そのガドリニア濃度は異なる場合がある。

【００５０】

本明細書において燃料集合体または燃料棒の「ガドリニア濃度」とは、「ガドリニア濃度の平均値」もしくは「ガドリニア濃度の最高値」をいう。

【００５１】

従来設計は図９で説明したように、基本的にガドリニア入り燃料棒の種類は同じであり、その本数が異なるのみであるのに対して、本実施形態では、図１に示すとおり、ガドリニア入り燃料棒の本数及びガドリニア濃度の異なる燃料集合体群が３種類ある。

【００５２】

上記燃料集合体群は、ガドリニア濃度が、燃料集合体群１＜燃料集合体群２＜燃料集合体群３の関係になっている。

【００５３】
また、上記燃料集合体群は、ガドリニア含有燃料棒の本数が、燃料集合体群１＞燃料集合体群２＞燃料集合体群３の関係になっている。
【００５４】
このような燃料集合体群の無限増倍率は、図２に示すように、無限増倍率のピークとなる燃焼度が、燃料集合体群１＜燃料集合体群２＜燃料集合体群３となる。
【００５５】
このため、運転サイクル長さが長くなった場合には、燃料集合体群３をより多く炉内に装荷し、逆に運転サイクル長さが短くなった場合には燃料集合体群１をより多く炉内に装荷することにより、図３に示すように余剰反応度は常に適切に制御することができる。
【００５６】
図４は、本実施形態による燃料集合体の炉心配置を示す。
【００５７】
図４（ａ）は１６ヶ月の運転サイクルの例、図４（ｂ）は１９ヶ月の運転サイクルの例、図４（ｃ）は１３ヶ月の運転サイクルの例をそれぞれ示している。
【００５８】
本実施形態は、運転サイクル長さとして13ヶ月～19ヶ月を想定しており、その場合の取替体数は１４４体から２３２体となることを想定している。
【００５９】
運転サイクル長さが長い場合、取替体数が増えることから、燃料集合体１体あたりのガドリニア入り燃料棒本数を少なくしないと、炉内に装荷されるガドリニア入り燃料棒総数が多くなり、サイクル初期の余剰反応度が低下し過ぎる。
【００６０】
そのため、本実施形態は、ガドリニア入り燃料棒本数は燃料集合体群１＞燃料集合体群２＞燃料集合体群３の関係となっている。
【００６１】
本実施形態は、ガドリニア濃度が異なる燃料集合体群を３種類設けることにより、長い運転サイクルに対して、燃料集合体群間のガドリニア濃度の差を小さくすることができる。
【００６２】
ここで、仮に燃料集合体間のガドリニア濃度の差が大きい場合の余剰反応度について説明する。
【００６３】
図５は燃料集合体群間のガドリニア濃度の差が適切な場合の例を示している。
【００６４】
ガドリニア本数の少なく、ガドリニア濃度の高い燃料集合体を多く装荷することで、サイクル初期の余剰反応度を高く調整することができる。逆にガドリニア本数の多く、ガドリニア濃度の低い燃料集合体を多く装荷することで、サイクル初期の余剰反応度を低く調整することができる。
【００６５】
次に図６は燃料集合体群間のガドリニア濃度の差が大きすぎる例を示している。
【００６６】
この例では、ガドリニア本数の少なく、ガドリニア濃度の高い燃料集合体を多く装荷しても、ガドリニアの燃え残りがあるためサイクル初期の余剰反応度はかえって低下してしまう。
【００６７】
このように、特公平7-92513の技術を長期運転に適用すると可燃性毒物濃度差が大きくなり、サイクル初期の余剰反応度を適切に制御することができない。
【００６８】
本実施形態では、ガドリニア濃度の異なる燃料集合体群を３種類にすることにより、燃

料集合体間のガドリニア濃度差を２ｗｔ％以下にして、長期運転においても適切に余剰反応度を制御することができる。

【００６９】

さらに、燃料製造の観点からは燃料ペレット種類数が少ないことが望まれ、燃料集合体群１，２，３に使用されるガドリニア入りペレット種類は可能な範囲で共通化することにより、製造コストを低減することが可能である。

【００７０】

前記燃料集合体群１と燃料集合体群２を構成するペレットは、可燃性毒物濃度および核分裂性物質濃度により決定されるペレット種類に関して３０％以上のペレットが同一種類のペレットであることが好ましい。

【００７１】

また、前記燃料集合体群２と燃料集合体群３を構成するペレットは、可燃性毒物濃度および核分裂性物質濃度により決定されるペレット種類に関して３０％以上のペレットが同一種類のペレットであることが好ましい。

【００７２】

さらに本発明の一面によれば、燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の燃料集合体を有し、前記各燃料集合体群はその燃料集合体の可燃性毒物を含むペレットを装填されかつ該ペレットが燃料棒の全長の８５％以内の範囲にのみ装填された燃料棒を有し、可燃性毒物の濃度平均値が高い燃料集合体ほど前記燃料棒を多く含むことで、軸方向の出力分布を適切に調整できる。

【００７３】

なお、以上の本実施形態の説明では、３種類の燃料集合体群１、２、３を用いて説明したが、その設計対象とする運転サイクル長さに応じて、燃料集合体群種類を４種類以上にすることも可能である。

【００７４】

特に、本実施形態では１３ヶ月から１９ヶ月までの運転期間を対象としているが、例えば１０ヶ月から２４ヶ月の運転期間を対象とする場合は、燃料集合体群間の可燃性毒物の濃度差が大きくなり、上述したように燃料集合体群間の可燃性毒物の濃度差が２ｗｔ％を超えるときは、適宜４種類以上の燃料集合体群を設けるようにすることが好ましい。

【００７５】

また、ガドリニア入り燃料棒本数は運転サイクル長さが長いほど本数が減少する傾向があり、現在のような取出平均燃焼度が５０ＧＷｄ／ｔ程度で最高濃縮度が５ｗｔ％以下とする制約がある中では、ある燃料集合体群に含まれる平均ガドリニア入り燃料棒本数の全燃料棒本数に対する割合（β）は、その最適化目標の運転月数（α）に対して以下のような関係となる。

上限：$\beta = -4/9 \times \alpha + 26$

下限：$\beta = -4/9 \times \alpha + 23$

【００７６】

７本分の太径ウォータロッドを持つ９×９燃料で、１３ヶ月、１６ヶ月、１９ヶ月に対しては、表１のようになり、図１の実施形態が包含されることが分かる。

【表１】

表１　運転期間とガドリニア入り燃料棒本数の例

運転期間(ヶ月)	上限本数	下限本数
13	15	13
16	14	12
19	13	11

【００７７】

燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）がある場合に、

の各燃料集合体群の燃料集合体の可燃性毒物含有燃料棒の本数の割合β（％）は、設計運転期間をα（月）とすると、下記の関係を満たすことが好ましい。

（－４／９×α＋２３）≦β≦（－４／９×α＋２６）

【００７８】

炉心における燃料集合体の配置については、図４（ａ），（ｂ），（ｃ）に示すとおり、例えば１６ヶ月運転の場合では、燃料集合体群１は炉心外周領域に多く装荷され、燃料集合体群１よりもガドリニア濃度の濃い燃料集合体群２、３は炉心中央領域に多く装荷されている。炉心外周領域は中性子の漏れが大きいことからガドリニアの燃焼が進みにくいため、ガドリニア濃度の薄い燃料集合体群１を装荷することにより、運転サイクル末期までにガドリニアを燃え尽きさせ、反応度損失がないようにしている。

【００７９】

このため、炉心の外周領域に燃料集合体群１，２，３の燃料集合体を配置し、外周領域においてガドリニア濃度の低い燃料集合体群１の燃料集合体がガドリニア濃度の高い燃料集合体群２，３の燃料集合体の総数より多いように配置されることが好ましい。

【００８０】

炉心中央領域は熱的特性を燃料集合体配置により調整するために、通常ガドリニア量の異なる燃料集合体が２種類必要であり、従来の２種類の燃料集合体のみで構成された炉心では、このような技術を用いることができない。

【００８１】

［第２の実施形態］

次に、燃料棒の軸方向に可燃性毒物の濃度の分布がある本発明の第２の実施形態について説明する。

【００８２】

図７は、本実施形態における燃料集合体群のガドリニア濃度分布を示している。

【００８３】

ＢＷＲでは軸方向にボイド分布が存在するため、燃料集合体上部に比較して下部のガドリニアの燃焼が速い。このため、燃焼を通じて軸方向出力分布をほぼ所望の分布に保持するためには、下部のガドリニア濃度を濃くする必要がある。この傾向は運転サイクル長さが長くなると顕著になる。図７のように各燃料集合体群に対して、想定する運転サイクル長さに応じた軸方向ガドリニア濃度分布を設定した上で、炉内装荷割合を調節することで、幅広い運転サイクル長さに対して、軸方向出力分布を所望の分布にすることができる。

【００８４】

本実施形態では、燃料棒の軸方向にガドリニア濃度分布が設定してあり、その上下濃度差が燃料集合体１＜燃料集合体２＜燃料集合体３となっている。

【００８５】

燃料集合体群１，燃料集合体群２，・・・，燃料集合体群ｎ（ｎ≧３）の燃料集合体を有する場合に、これらの燃料集合体は軸方向下方ほど可燃性毒物濃度を高くし、可燃性毒物濃度平均値が高い燃料集合体ほど、軸方向の可燃性毒物濃度の差が大きいようにすることが好ましい。

【００８６】

［第３の実施形態］

次に、複数種類の燃料集合体を有し設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる燃料集合体群と、他の一種類の燃料集合体を有する燃料集合体群を組み合わせた原子炉の炉心について説明する。

【００８７】

図８は、本実施形態における燃料集合体群を示している。

【００８８】

本実施形態は、従来のガドリニア２種類方式と本発明のガドリニア多種類方式を組み合わせたものであり、運転サイクル長さは１６ヶ月固定を想定しつつ、運転サイクル長さが短くなった場合にも対応可能であることを目標としたものである。

【００８９】
本実施形態は、基準となる運転サイクル長さ１６ヶ月用に、ガドリニア濃度差が０．５ｗｔ％以内でガドリニア入り燃料棒本数の異なる２種類の燃料集合体（燃料集合体群２(低Ｇｄ)、燃料集合体群３(高Ｇｄ)）と、運転サイクル長さが短くなった場合の補助としてガドリニア濃度の低い燃料集合体1種類（燃料集合体群１）を有している。
【００９０】
本実施形態では経験豊富な従来のガドリニア２種類方式を基本とすることで、設計の簡略化が可能である。
【００９１】
また、炉心設計においても、従来のように熱的に厳しい位置にガドリニア入り燃料棒本数の多い燃料を選択的に装荷することを基本とした上で、ガドリニアの燃焼の遅い炉心外周領域にガドリニアの薄い燃料集合体を装荷する点にのみ配慮すれば、容易に運転サイクル長さに対する融通性向上とガドリニア燃え残り軽減による経済性向上を得ることができる。
【００９２】
また、燃料集合体群２，３の２種類の燃料により、サイクル初期の余剰反応度を調整するため、ガドリニア入り燃料棒本数差を従来のガドリニア２種類方式と同等に設定し、一方、補助的な燃料集合体群１はその中間的なガドリニア入り燃料棒本数とすることができる。このようにすることにより、運転融通性を確保しつつも、目標とする運転サイクル長さに容易に最適化することができる。
【００９３】
すなわち、本発明の一面によれば、可燃性毒物含有燃料棒の本数および燃料集合体可燃性毒物濃度平均値が異なる２種類の燃料集合体からなり設計運転サイクルの期間内の所定の時点に毒物効果がほぼなくなる燃料集合体群と、前記燃料集合体群の２種類の燃料集合体の可燃性毒物含有燃料棒の本数の間の本数の可燃性毒物含有燃料棒を有し、かつ設計運転サイクル期間の早い段階で毒物効果がなくなる１種類の燃料集合体からなる燃料集合体群と、を有することができる。
【００９４】
［第４の実施形態］
次に燃料棒のペレット密度と初期ヘリウム封入圧を変化させた実施形態について説明する。
【００９５】
表２は、本実施形態による燃料棒のペレット密度と初期ヘリウム封入圧を示している。
【表２】

表2 実施形態4

	従来燃料	本発明
ペレット密度 (%理論密度)	96.5	97.0
初期 He 封入圧 (MPa)	1.0	0.7

【００９６】
本発明は運転サイクル長さが従来の１３ヶ月程度よりも大幅に長いことを想定しており、ガドリニア濃度も従来よりもかなり高くなると考えられる。
【００９７】
ガドリニア濃度が高くなると、ペレット熱伝導率が低下する傾向があり、ペレット温度の上昇やそれに伴う核分裂性ガス放出量の増加の要因となることがある。
【００９８】
そこで、ガドリニア濃度が高いペレットについてはペレット密度を高くすることで熱伝

導率の低下を抑制する。

【００９９】

なお、ペレット密度を細かく変更することは製造上困難を伴うため、炉内装荷される燃料集合体のうち最もガドリニア濃度の高いペレットに合わせて、ペレット密度を最適化し、それを全てのペレットで使用するのが現実的である。

【０１００】

すなわち、本発明の一面によれば、可燃性毒物を含むペレット密度の中央値が９７％である。

【０１０１】

また、前述のようにペレット密度を高くしているので、核分裂性ガス放出量は十分抑制されるため、核分裂性ガス放出量低減のために高くしていた初期希ガス封入圧を若干下げることも可能である。これにより製造コストを低減させることが可能である。

【０１０２】

すなわち、本発明の他の一面によれば、燃料棒のヘリウムの初期封入圧が０．７（ＭＰａ）である。

【０１０３】

なお、以上の各実施形態は可燃性毒物としてガドリニアを用いたものであるが、可燃性毒物はガドリニア、ホウ素、エルビア、およびそれらの組合せからなるものを用いることができる。

【図面の簡単な説明】

【０１０４】

【図１】本発明の一実施形態による原子炉の炉心を構成する燃料集合体群の構成を示した図。

【図２】図１の燃料集合体群の燃焼度と無限増倍率の推移を示したグラフ。

【図３】本発明の一実施形態による燃焼度と余剰反応度の推移を示したグラフ。

【図４（ａ）】本発明の一実施形態による１６ヶ月の運転サイクルの燃料集合体の炉心配置を示す図。

【図４（ｂ）】本発明の一実施形態による１９ヶ月の運転サイクルの燃料集合体の炉心配置を示す図。

【図４（ｃ）】本発明の一実施形態による１３ヶ月の運転サイクルの燃料集合体の炉心配置を示す図。

【図５】可燃性毒物含有燃料棒の本数による余剰反応度の推移への影響と、好ましい燃料集合体群の組合せによる余剰反応度の推移とを示したグラフ。

【図６】可燃性毒物含有燃料棒の本数による余剰反応度の推移への影響と、好ましい燃料集合体群の組合せによる余剰反応度の推移を示したグラフ。

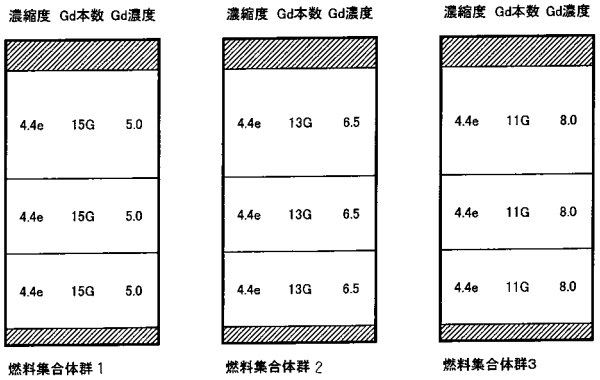
【図７】本発明の一実施形態による原子炉の炉心を構成する燃料集合体群の構成を示した図。

【図８】本発明の一実施形態による原子炉の炉心を構成する燃料集合体群の構成を示した図。

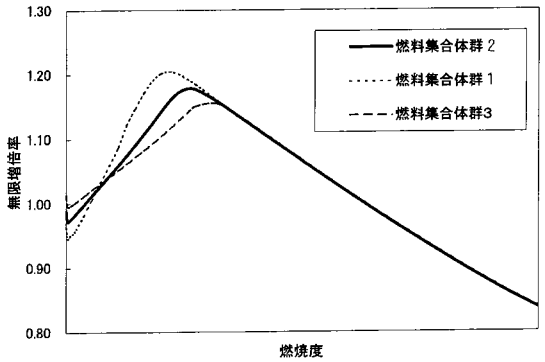
【図９】従来のガドリニアを核燃料物質に混ぜた燃料棒を有する燃料集合体群の例を示した図。

【図１０】ガドリニアを混入した燃料集合体の無限増倍率の燃焼度変化を示したグラフ。

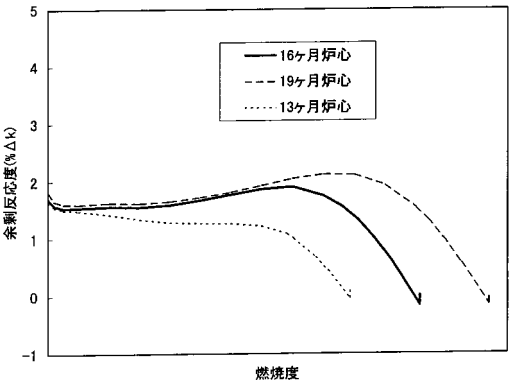
【図１】



【図２】



【図３】



【図４（ａ）】

						5	4	4	4	4	4	4
					5	4	4	4	4	4	4	4
				5	4	4	2	2	2	G1	2	G1	2
				4	4	2	4	2	G1	2	G2	2	G2
			5	4	2	G1	2	G1	4	G2	4	G2	4
		5	4	4	2	G1	2	G1	4	2	3	2	3	2
		4	4	2	G1	3	3	2	G2	3	3	3	G3	3
	5	4	2	G1	2	3	3	G3	3	3	3	G3	2	3
5	4	2	4	2	G1	2	G3	2	G2	2	G2	3	G2	2
4	4	2	2	G1	4	G2	3	G2	2	3	2	G3	3	G2
4	4	2	G1	4	2	3	3	2	3	3	3	3	G2	3
4	4	G1	2	G2	3	3	3	G2	2	3	3	2	3	3
4	4	2	G2	4	2	3	G3	3	G3	3	2	3	G2	3
4	4	G1	2	G2	3	G3	2	G2	3	G2	3	G2	2	G3
4	4	2	G2	4	G2	3	3	2	G2	3	3	2	3	3

炉心装荷パターン（１６ケ月運転時の例）

【図４（ｂ）】

						4	4	4	4	3	3	3
					4	2	2	G1	2	G1	2	G1
				4	4	2	2	G1	3	3	2	G1	3
				4	2	3	G3	2	3	3	G3	2	3
			4	2	2	G2	2	G3	2	G3	2	G2	2
		4	4	2	3	G3	2	G3	3	G3	2	G3	3	G3
		4	2	2	G3	3	3	2	G3	3	3	2	G3	3
	4	2	3	G2	2	3	3	G3	2	3	3	G3	2	3
4	2	2	G3	2	G3	2	G3	3	G3	2	G3	3	G2	2
4	2	G1	2	G3	3	G3	2	G3	3	G3	2	G3	3	2
4	G1	3	3	2	G3	3	3	2	G3	3	3	2	G3	3
4	2	3	3	G3	2	3	3	G3	2	3	3	G3	2	3
3	G1	2	G3	2	G3	2	G3	3	G3	2	G3	3	G2	2
3	2	G1	2	G2	3	G3	2	G2	3	G3	2	G2	3	G2
3	G1	3	3	2	G3	3	3	2	G2	3	3	2	2	3

炉心装荷パターン（１９ケ月運転時の例）

符号の説明：

G1	燃料集合体群1
G2	燃料集合体群2
G3	燃料集合体群3
2	2サイクル目燃料
3	3サイクル目燃料
4	4サイクル目燃料
5	5サイクル目燃料

符号の説明：

G1	燃料集合体群1
G2	燃料集合体群2
G3	燃料集合体群3
2	2サイクル目燃料
3	3サイクル目燃料
4	4サイクル目燃料
5	5サイクル目燃料

【図４（ｃ）】

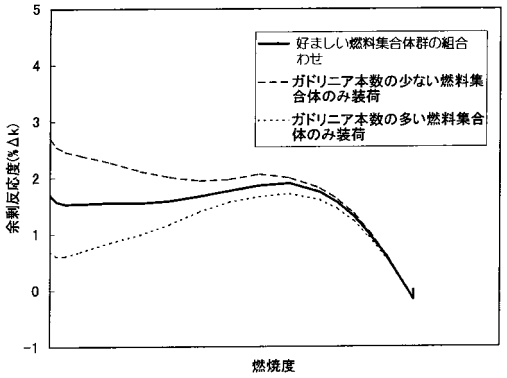
						6	5	5	5	5	5	5
					6	5	5	5	5	5	5	5
				6	6	5	5	5	2	2	2	2	2
				6	5	2	2	2	G1	3	G1	4	G1
			6	5	2	G1	3	G1	4	G1	4	G1	4
		6	6	5	2	G1	3	G1	4	2	4	2	4	2
		6	5	2	G1	3	3	4	G1	3	3	4	G2	3
	6	5	2	G1	3	3	3	G1	4	3	3	2	4	3
6	5	5	2	3	G1	4	G1	4	G1	4	G1	4	G2	2
5	5	5	2	G1	4	G1	4	G1	4	2	4	2	4	G2
5	5	2	G1	4	2	3	3	4	2	3	3	4	G2	3
5	5	2	3	G1	4	3	3	G1	4	3	3	2	3	3
5	5	2	G1	4	2	4	2	4	2	4	2	4	G3	3
5	5	2	4	G1	4	G2	4	G2	4	G2	3	G3	4	2
5	5	2	G1	2	G2	3	3	3	2	3	3	3	4	3

炉心装荷パターン（１３ケ月運転時の例）

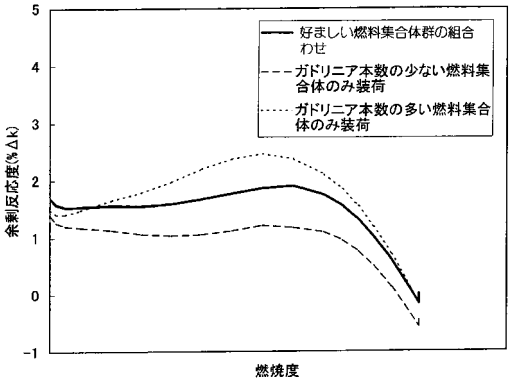
符号の説明：

G1	燃料集合体群1
G2	燃料集合体群2
G3	燃料集合体群3
2	2サイクル目燃料
3	3サイクル目燃料
4	4サイクル目燃料
5	5サイクル目燃料

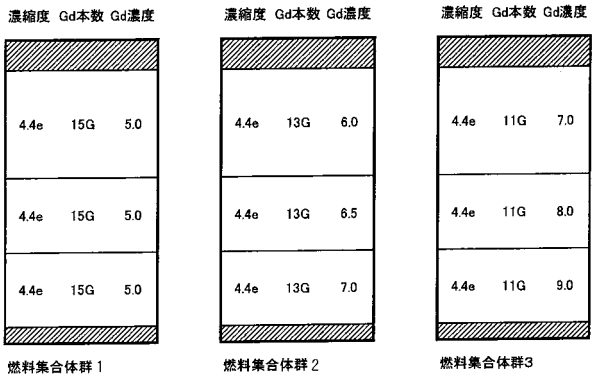
【図５】



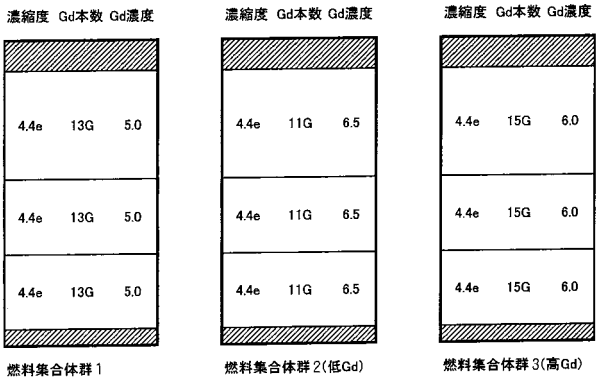
【図６】



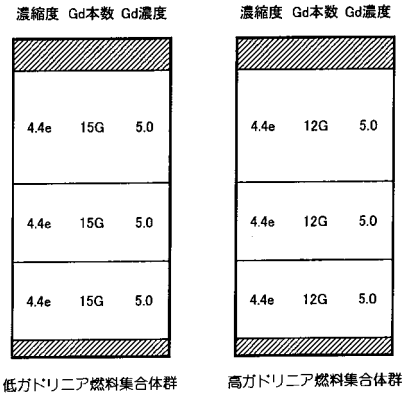
【図７】



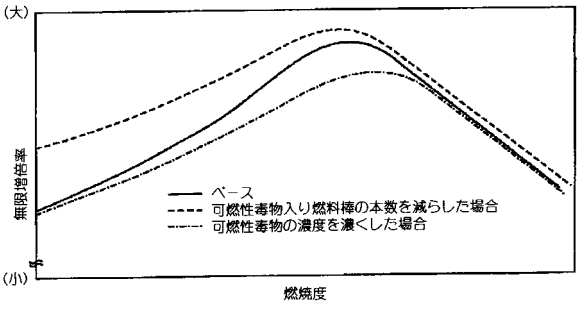
【図８】



【図９】



【図１０】



フロントページの続き

(72)発明者 金 子 浩 久
神奈川県横須賀市内川二丁目３番１号 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン内
(72)発明者 山 中 章 広
神奈川県横須賀市内川二丁目３番１号 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン内
(72)発明者 藤 巻 真 吾
神奈川県横須賀市内川二丁目３番１号 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン内

審査官 青木 洋平

(56)参考文献 特開２００２－３５０５８０（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－２０９４６０（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－３４７５７８（ＪＰ，Ａ）
特開２００１－２０８８８１（ＪＰ，Ａ）
特開昭６１－０４０５８７（ＪＰ，Ａ）
特開昭５８－１８６０８１（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－１２８４７３（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ２１Ｃ ５／００－５／２２