

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4088735号
(P4088735)

(45) 発行日 平成20年5月21日(2008.5.21)

(24) 登録日 平成20年3月7日(2008.3.7)

(51) Int.Cl.

F I

G 2 1 C 3/328 (2006.01)

G 2 1 C 3/30 G D B X

G 2 1 C 5/00 (2006.01)

G 2 1 C 3/30 D

G 2 1 C 5/00 B

請求項の数 3 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平11-86556
 (22) 出願日 平成11年3月29日(1999.3.29)
 (65) 公開番号 特開2000-284081(P2000-284081A)
 (43) 公開日 平成12年10月13日(2000.10.13)
 審査請求日 平成16年10月15日(2004.10.15)

(73) 特許権者 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (74) 代理人 100098017
 弁理士 吉岡 宏嗣
 (72) 発明者 榊見 亮司
 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
 工場内
 (72) 発明者 原口 裕子
 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
 工場内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 核燃料集合体及び沸騰水型原子炉の炉心

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

核分裂性物質を含む燃料を被覆管に充填した複数本の燃料棒を正方格子状に束ねた燃料棒束を角筒状のチャンネルボックスで覆ってなる燃料集合体において、

前記チャンネルボックスと前記燃料棒束とを接合するチャンネルファスナを固定し前記正方格子の一コーナーに位置する前記燃料棒を基準位置として、横断面で該基準位置のコーナーとそれに対角位置のコーナーとは別の他の2つのコーナーに位置する燃料棒を結ぶ直線を境にして燃料集合体を2つの領域に分割し、チャンネルファスナ側領域とその反対側の反対側領域とするとき、

前記チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒及び前記反対側領域にある複数の燃料棒の燃料有効長の上部の所定部分について、前記チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度は、前記反対側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度よりも低く、前記チャンネルファスナ側領域にある燃料棒の平均可燃性毒物濃度は、前記反対側領域にある燃料棒の平均可燃性毒物濃度よりも低く、かつ前記チャンネルファスナを固定する燃料棒の座標を(1,1)としたとき(2,2)、(2,3)、(3,2)の座標に位置する燃料棒は可燃性毒物を添加しない燃料棒とし、前記座標以外の燃料棒のうち少なくとも1本以上を可燃性毒物を添加した燃料棒とするとともに、

前記チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒及び前記反対側領域にある複数の燃料棒の燃料有効長の下部の所定の領域については、前記チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度は、前記反対側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度と等しく

10

20

したことを特徴とする燃料集合体。

【請求項 2】

中性子吸収材を含む十字型制御棒を中心に 4 体の燃料集合体が隣接してなる複数の制御棒セルを配列して備えた沸騰水型原子炉の炉心において、請求項 1 に記載の複数の燃料集合体を含むことを特徴とする沸騰水型原子炉の炉心。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の沸騰水型原子炉の炉心において、1 サイクルの運転を終了したときに燃焼の進んだ燃料集合体を未照射の燃料集合体で置き換える割合を全燃料集合体数の 2 / 7 以上とするとともに、運転中に炉心に挿入する前記十字型制御棒の周囲に炉内滞在 2 サイクル目または 3 サイクル目の燃料集合体を少なくとも 1 つ配置したことを特徴とする沸騰水型原子炉の炉心。

10

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、沸騰水型原子炉（以下、BWR と略記する）の燃料集合体及び炉心に関する。

【0002】

【従来の技術】

原子力発電の経済性を一層向上させるためのひとつの方策としては、単位燃料重量当たりの取出エネルギーを高める高燃焼度化が有効である。高燃焼度化のために燃料の平均濃縮度を高くすると、熱中性子がウラン - 235 に吸収される割合が大きくなり、中性子吸収材に吸収される割合は小さくなるために、制御棒価値及びガドリニア反応度価値が低下する。その結果、原子炉の停止余裕が減少する。停止余裕を確保するためには、多数のガドリニア入り燃料棒を配置する必要が生じ、燃料集合体内の局所出力ピーキング係数が増大して炉心の熱的余裕が低下するという問題が生じる。

20

【0003】

上記の問題に対しては、特開平4-122888号公報に記載のように、(1)制御棒側に位置する燃料棒の平均濃縮度は、反制御棒側に位置する濃縮度よりも低く、かつ、(2)制御棒側に位置する燃料棒の平均可燃性毒物濃度は、反制御棒側よりも低いという燃料集合体の構成が有効である。

【0004】

30

運転サイクルを長期化してプラント利用率を向上させることによって、経済性を高めることが可能である。運転サイクルの長期化に伴い、制御すべき余剰反応度は増大する。これを抑えるためにガドリニア入り燃料棒の本数を増やすと、制御棒の近傍にもガドリニア入り燃料棒を配置することになるが、これは、制御棒近傍の熱中性子束を低下させるため、制御棒価値を減少させる。さらにこの燃料集合体に隣接する制御棒を余剰反応度制御のために運転中に挿入する場合、制御棒近傍の燃料棒の出力が低く抑えられて燃焼が遅れるため、制御棒が引き抜かれたときにこの領域の燃料棒の出力が高くなる傾向がある。すなわち、ガドリニア入り燃料棒は、運転サイクルを通じて余剰反応度を制御するため、ガドリニアが過度に早く燃え尽きることのないよう、通常、熱中性子束の高い燃料集合体の最外周を避け、外周から 2 層目ないしこれより内側に配置される。ガドリニア入り燃料棒またはその近傍の燃料棒の出力において、制御棒履歴の影響により燃料寿命中期から末期で問題となるのは十字型制御棒側のコーナーに位置するチャンネルファスナを固定する燃料棒の座標を (1, 1) とあらわした場合、(1, 1)、(1, 2)、(2, 1) に位置する燃料棒であり、これらの燃料棒の出力に影響するのは、ガドリニア入り燃料棒を上記の燃料棒に近い (2, 2)、(2, 3)、(3, 2) の位置に配した場合である。

40

【0005】

上記の従来技術、すなわち、(1)及び(2)の構成では、制御棒側の個々の燃料棒の出力については考慮されていない。したがって、制御棒側のコーナーに位置する燃料棒の座標を (1, 1) とした場合、(2, 2)、(2, 3)、(3, 2) の位置に可燃性毒物入り燃料棒を配置すると、これらに隣接する (1, 1)、(1, 2)、(2, 1) の燃料棒の出力は、燃料寿命初期

50

には隣接する可燃性毒物により抑えられ、燃料寿命中期には、隣接する制御棒が挿入されることにより抑えられ、他の燃料棒に比べ燃焼が遅れるため、制御棒を引き抜いたときに出力が高くなる。このような問題が生じるのは、燃料棒の燃料有効長の上部のみである。その一方、燃料棒の燃料有効長の下部は、サイクルの初期から中期において、炉心下部で核分裂反応が起こりやすいため、上部に比べて出力が高くなりやすい。したがって、サイクルの初期から中期においては、制御棒側の出力が反対側に比べて大きくならないようにすることが望まれる。

【 0 0 0 6 】

【 発明が解決しようとする課題 】

本発明の目的は、上記に鑑み、高燃焼度化あるいは運転サイクル長期化のために平均濃縮度を高めた場合でも、燃料寿命を通じて熱的余裕を確保し、燃料の機械的健全性を維持することにより、経済性を向上できる燃料集合体及び沸騰水型原子炉の炉心を提供することにある。

【 0 0 0 7 】

上記目的を達成するために、本発明の燃料集合体は、核分裂性物質を含む燃料を被覆管に充填した複数本の燃料棒を正方格子状に束ねた燃料棒束を角筒状のチャンネルボックスで覆ってなる燃料集合体において、チャンネルボックスと燃料棒束とを接合するチャンネルファスナを固定し正方格子の一コーナーに位置する燃料棒を基準位置として、横断面で該基準位置のコーナーとそれに対角位置のコーナーとは別の他の2つのコーナーに位置する燃料棒を結ぶ直線を境にして燃料集合体を2つの領域に分割し、チャンネルファスナ側領域とその反対側の反対側領域とすると、チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒及び反対側領域にある複数の燃料棒の燃料有効長の上部の所定部分について、(1)チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度は、反対側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度よりも低く、(2)チャンネルファスナ側領域にある燃料棒の平均可燃性毒物濃度は反対側領域にある燃料棒の平均可燃性毒物濃度よりも低く、かつ(3)チャンネルファスナを固定する燃料棒の座標を(1,1)としたとき、(2,2)、(2,3)、(3,2)の座標に位置する燃料棒は可燃性毒物を添加しない燃料棒とし、上記座標以外に位置する燃料棒のうち少なくとも1本以上を可燃性毒物を添加した燃料棒とするとともに、チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒及び反対側領域にある複数の燃料棒の燃料有効長の下部の所定の領域については、チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度は、反対側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度と等しくしたことを特徴とする。

【 0 0 0 8 】

本発明は、チャンネルファスナ側領域にある複数の燃料棒及び反対側領域にある複数の燃料棒の燃料有効長の上部の所定部分については、(1)、(2)及び(3)の構成を組み合わせることで、それぞれの構成を単独で実施した場合には得られない作用効果が得られることに着目したものである。次にこの燃料集合体の作用について説明する。ところで燃料集合体は4体を組としてそれらの中心に十字型制御棒が配置された制御セルとして原子炉に装荷される。本発明の燃料集合体においてチャンネルボックスと燃料棒束とを接合するチャンネルファスナを固定し正方格子の一コーナーに位置する燃料棒の基準位置は、十字型制御棒で十字に交差する角にあたるので、説明の都合上、上記の「チャンネルファスナ側領域」及び「反対側領域」を、それぞれ「制御棒側領域」及び「反制御棒側領域」と、ときに言い換える。

【 0 0 0 9 】

本発明の構成によれば、制御棒側領域にある複数の燃料棒及び反制御棒側領域にある複数の燃料棒の燃料有効長の上部の所定部分については、燃料寿命初期から中期では、制御棒側領域の無限増倍率が反制御棒側領域のそれよりも高くなるため、制御棒側領域の燃料棒の燃焼が促進される。特に、燃料寿命中期から末期で熱的に問題となる制御棒側のコーナー(1,1)を基準とする(2,2)、(2,3)、(3,2)の燃料格子に位置する燃料棒の燃焼が初期から中期の間に進む。燃料寿命中期から末期では、反制御棒側領域の無限増倍率が制御棒側領域のそれよりも高くなるため、燃焼の進みかたの違いとあいまって、制御棒側

10

20

30

40

50

領域の燃料棒の出力は低く抑えられる。したがって、燃料寿命中期から末期において隣接する制御棒が運転中に挿入される場合でも、既に制御棒側の燃料棒の燃焼は進んでいるため、制御棒が引き抜かれたときにも制御棒近傍の燃料棒の出力が過大となることはない。

【0010】

以上説明したように、本発明によれば、制御棒領域にある複数の燃料棒及び反制御棒領域にある複数の燃料棒の燃料有効長の上部の所定部分については、燃料棒出力に及ぼす制御棒履歴の影響を低減して燃料寿命を通じて熱的余裕を確保できるため、燃料の平均濃縮度を増加させて高燃焼度化または運転長期化を図ることにより、BWRの経済性を向上させることができる。また熱的余裕の故に、燃料ペレットの熔融や燃料被覆管の塑性歪等の損傷がない燃料の機械的健全性を維持することができる。

10

【0011】

これに加えて、本発明の燃料集合体は、上述のように、制御棒側領域の燃料棒および反制御棒側領域の燃料棒の燃料有効長の下部の所定の領域については、制御棒側領域にある複数の燃料棒の平均濃縮度は、反制御棒側領域のそれと等しくしている。

【0012】

上記のように燃料集合体の上部に対して(1)～(3)を適用し、下部で両領域での平均濃縮度を等しくしたのは、次の理由による。BWR炉心では、冷却水が炉心下部から流入し、炉心を冷却することにより沸騰水(二相流)となって上部から流出していくため、炉心下部では炉心上部に比べ減速材(水)密度が大きくなる。サイクル初期から中期では、上記により炉心下部で核分裂反応が起こりやすいため、出力も下部の方が高くなりやすい。一方、サイクル末期では、炉心上部でウラン-235が燃え残っており、また減速材密度が低く中性子エネルギーが比較的高いためウラン-238からプルトニウム-239への転換が促進されることから、炉心上部の出力が高くなりやすい。高燃焼度化、または運転長期化した炉心に装荷する燃料集合体では、ウラン濃縮度が高いことからガドリニア入り燃料棒を多数配置するため、サイクル末期の制御棒引き抜き時に生じる炉心上部の出力ピークが大きくなる傾向がある。そこで本発明では、サイクル初期から中期における特に炉心上部の制御棒側の出力が過度に低くならないようにすることにより均等に燃焼を進めて制御棒側のウラン-235が燃え残らないようにし、サイクル末期の炉心上部の制御棒側の出力が過度に高くないようにするとともに、サイクルの初期から中期における、炉心下部の制御棒側の出力が反対側に比べて大きくならないようにしている。

20

30

【0013】

また、上記目的を達成するために、本発明の沸騰水型原子炉の炉心は、中性子吸収材を含む十字型制御棒を中心に4体の燃料集合体が隣接してなる複数の制御棒セルを配列して備えた炉心において、上記本発明の燃料集合体を複数体含むものである。

【0014】

そしてこの沸騰水型原子炉の炉心において、十字型制御棒が挿入される、制御棒セル内で隣り合う燃料集合体の間隙を、制御棒がなく制御棒セル間で隣り合う燃料集合体の間隙より大きくするとよい。またこの沸騰水型原子炉の炉心は、1サイクルの運転を終了したときに燃焼の進んだ燃料集合体を未照射の燃料集合体で置き換える割合を全燃料集合体数の2/7以上とするとともに、運転中に炉心に挿入する十字型制御棒の周囲に炉内滞在2サイクル目または3サイクル目の燃料集合体を少なくとも1つ配置することが好ましい。

40

【0015】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図面を用いて説明する。本発明の実施の形態では、いずれも、燃料として濃縮ウランの二酸化物(UO_2)を、可燃性毒物としてはガドリニア(Gd_2O_3)を使用しているが、プルトニウムを富化したウランの二酸化物(MOX)や回収ウランの二酸化物等のその他の燃料物質や、ホウ素やユーロピウムの化合物等、その他の可燃性毒物を使用することもできる。

【0016】

図1は、本発明の第1実施の形態のBWR用燃料集合体の横断面図を示したものである。燃

50

料集合体は、燃料棒 10 が 9×9 の正方格子状に配置されており、その中央部には、中性子の減速が燃料集合体内で均等に行われるように水が流れる太径のウォータロッド 5 が 2 本配置されている。ここで、2 本のウォータロッド 5 は、7 本の燃料棒を配置可能な領域に設置されている。燃料集合体 4 体に 1 本の割合で十字形の制御棒 6（一部のみ図示）が装荷される。制御棒 6 の制御材としては炭化ホウ素またはハフニウムが使用される。

【0017】

燃料集合体 8 はウラン濃縮度及びガドリニア濃度の異なる 6 種類の燃料棒からなる。図 2 に、本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。

【0018】

高濃縮度燃料棒 1 は、燃料有効長を軸方向に 24 ノードに分けた場合、上端の 2 / 24 及び下端の 1 / 24 に天然ウランを配置し、その間の 21 / 24 は濃縮度 4.9 wt % でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ウラン部のみにについて説明する。中濃縮度燃料棒 2 は濃縮ウラン部の濃縮度は 4.0 wt % でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒 3 は濃縮ウラン部の濃縮度は 3.0 wt % でガドリニアを含まない。

【0019】

高濃縮度部分長燃料棒 1P は、他の燃料棒に比べ有効長が 15 / 24 と短く、濃縮度は 4.9 wt % でガドリニアを含まない。中濃縮度部分長燃料棒 2P は、やはり他の燃料棒に比べ有効長が約 2 / 3 と短く、濃縮度は 4.0 wt % でガドリニアを含まない。

【0020】

ガドリニア入り燃料棒 2G はウラン濃縮度は 4.0 wt % でガドリニア濃度を 5.0 wt % としている。

【0021】

本実施の形態では、燃料集合体全体の平均濃縮度は約 4.0 wt %、ガドリニア平均濃度は約 1.0 wt % である。ここで、燃料棒を制御棒側領域 21 と制御棒と反対側の領域（反制御棒側領域）22 に分けて両者を比較する。制御棒側領域 21 に配置される 34 本の燃料棒 10 の平均濃縮度は約 3.9 wt % であり、平均ガドリニア濃度は約 0.9 wt % である。これに対して、反制御棒側領域 22 に位置する燃料棒 34 本の燃料棒 1 ~ 3 の平均濃縮度は約 4.1 wt %、平均ガドリニア濃度は約 1.2 wt % と、いずれも制御棒側領域 21 よりも高く設定されている。

【0022】

本実施の形態によれば、無限増倍率は、図 3 に示すように燃料寿命初期から中期（0 ~ 20 GWd/t）では制御棒側領域 21 で反制御棒側領域 22 よりも大きくなる。燃料寿命中期から末期（20 ~ 45 GWd/t）では逆に反制御棒側で制御棒側よりも無限増倍率が大きくなる。このような作用により、燃料寿命中期から末期で隣接する制御棒を運転中に挿入する場合、この制御棒を引き抜いたときの出力上昇が過大になることはない。したがって、炉心の熱的余裕を確保でき、高燃焼度化や運転サイクル長期化が可能となる。また、最大線出力密度（燃料棒単位長さ当りの最大値）が過大にならず熱的余裕があるため、燃料ペレットの溶融や燃料被覆管の塑性歪の起きない、燃料の機械的健全性を維持することができる。

【0023】

なお、燃料集合体 8 の最外層に配置される燃料棒は、通常どおり、ガドリニアの含まない燃料棒である。ガドリニア入り燃料棒は、1 サイクルの余剰反応度を制御するために用いられ、サイクル末期にちょうどガドリニアが燃え尽きるようにその本数や濃度、装荷位置が設計される。したがって水ギャップに隣接して最も熱中性子が多くなる燃料集合体の最外層を避け、熱中性子が適切な密度で分布する燃料集合体の外周から 2 層目またはそれより内側にガドリニア入り燃料棒を装荷する。

【0024】

本発明の燃料集合体は、従来の燃料集合体と同様、図 19 の一部切欠斜視図に示すように、上部タイプレート 14a、下部タイプレート 14d、チャンネルファスナ 14b、スペ

10

20

30

40

50

ーサ 14c, ウォータロッド 5 (図示せず), 燃料棒 10, チャンネルボックス 7 などから構成される。このうち上部タイプレート 14a の 1 つのコーナー部に取り付けられたチャンネルファスナ 14b は、制御棒を中心として 4 体の燃料集合体を互いに固定するためのものであるから、燃料集合体単体でみた場合、上記制御棒側領域 21 はチャンネルファスナ 14b が位置する側の領域 (チャンネルファスナ領域) に相当する。また反制御棒側領域 22 はチャンネルファスナ領域の反対側の反対領域に相当する。

【0025】

次に、本発明を BWR の炉心に適用した実施の形態について説明する。図 4 は本発明の第 2 実施の形態の BWR 炉心の燃料装荷パターンを示す (炉心 1 / 4 横断面図)。図 4 の燃料集合体中の数字は当該燃料集合体の炉内滞在サイクル数を示す。

10

【0026】

電気出力は 1100 MW、熱出力は 3293 MW、燃料集合体数は 764 体、運転サイクル長さは 19 ヶ月、平均取出燃焼度を約 45 GWd / t である。このような運転条件の炉心では、1 サイクル当たりの取替体数が全燃料集合体数の 2 / 7 を超え、約 1 / 3 を一度に取り替えることになる。

【0027】

炉心からの中性子漏洩を減らして所要ウラン濃縮度を低減するため、最外周には燃焼の進んだ炉内滞在 3、4 サイクル目燃料を装荷する。制御棒履歴の影響を抑えるために残りの 3 サイクル目燃料を制御棒セル (太線で図示する、隣接する燃料集合体 4 体をいう) 11 に装荷すると、制御棒セル 11 以外のセルは 1 サイクル目燃料と 2 サイクル目燃料のみで構成する必要がある。このように比較的燃焼の進んでいない燃料から構成されるセルが多くなると停止余裕が減少する傾向がある。

20

【0028】

本実施の形態では、運転中に制御棒を挿入する制御棒セル 11 は、炉内滞在 2 サイクル目または 3 サイクル目の燃料集合体から構成される。このような構成によれば、制御棒を引き抜いたときの出力上昇が過大になることはなく、炉心の熱的余裕を確保できる。また、制御棒セル 11 以外に比較的燃焼が進んだ 3 サイクル目燃料を散在させることにより停止余裕を確保できる。したがって、運転サイクル長期化が可能となる。

【0029】

図 5 は、本発明の第 3 実施の形態の BWR 用燃料集合体の横断面図を示したものである。図 6 に本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。燃料集合体は、図 1 に示した第 1 実施の形態と同様に燃料棒 10 が 9 × 9 の正方格子状に配置されている。

30

【0030】

高濃縮度燃料棒 1 は、燃料有効長を軸方向に 24 ノードに分けた場合、上端の 2 / 24 及び下端の 1 / 24 に天然ウランを配置し、その間の 21 / 24 は濃縮度 4.9 wt % でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ウラン部のみについて説明する。中濃縮度燃料棒 2 は濃縮ウラン部の濃縮度は 4.0 wt % でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒 3 は濃縮ウラン部の濃縮度は 3.0 wt % でガドリニアを含まない。超低濃縮度燃料棒 4 は濃縮ウラン部の濃縮度は 2.0 wt % でガドリニアを含まない。

40

【0031】

高濃縮度部分長燃料棒 1P は、他の燃料棒に比べ有効長が 15 / 24 と短く濃縮度は 4.9 wt % でガドリニアを含まない。

【0032】

ガドリニア入り燃料棒 2G はウラン濃縮度は 4.0 wt % でガドリニア濃度を 5.0 wt % としている。

【0033】

本実施の形態では、燃料集合体全体の平均濃縮度は約 4.0 wt %、ガドリニア平均濃度は約 1.0 wt % である。制御棒側領域 21 に配置される 34 本の燃料棒 1 ~ 3 の平均濃縮度は約 3.9 wt % であり、平均ガドリニア濃度は約 0.9 wt % である。これに対し

50

て、反制御棒側領域 22 に位置する燃料棒 34 本の燃料棒 1 ~ 3 の平均濃縮度は約 4 . 1 w t %、平均ガドリニア濃度は約 1 . 2 w t %と、いずれも制御棒側領域 21 よりも高く設定されていることは第 1 実施の形態と同じである。

【 0 0 3 4 】

第 1 の実施の形態と異なるのは、最外周の燃料棒の濃縮度を制御棒側領域 21 で反制御棒側領域 22 べて低くしたことである。本実施の形態によれば、図 1 に示す第 1 実施の形態とほぼ同様な作用が得られ、炉心の熱的余裕を増大でき、高燃焼度化や運転サイクル長期化が可能となる。

【 0 0 3 5 】

図 7 は、本発明の第 4 実施の形態のBWR用燃料集合体の横断面図を示すものである。図 8 に、本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。燃料集合体は、図 1 に示した第 1 実施の形態と同様に燃料棒 10 が 9 × 9 の正方格子状に配置されている。

【 0 0 3 6 】

高濃縮度燃料棒 1 は、燃料有効長を軸方向に 24 ノードに分けた場合、上端の 2 / 24 及び下端の 1 / 24 に天然ウランを配置し、その間の 21 / 24 は濃縮度 4 . 9 w t %でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ウラン部のみについて説明する。中濃縮度燃料棒 2 は濃縮ウラン部の濃縮度は 4 . 0 w t %でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒 3 は濃縮ウラン部の濃縮度は 3 . 0 w t %でガドリニアを含まない。

【 0 0 3 7 】

高濃縮度部分長燃料棒 1Pは、他の燃料棒に比べ有効長が 15 / 24 と短く濃縮度は 4 . 9 w t %でガドリニアを含まない。

【 0 0 3 8 】

ガドリニア入り燃料棒 2Gはウラン濃縮度は 4 . 0 w t %でガドリニア濃度を 5 . 0 w t %としている。ガドリニア入り低濃縮度燃料棒 3Gはウラン濃縮度は 3 . 0 w t %でガドリニア濃度を 5 . 0 w t %としている。

【 0 0 3 9 】

本実施の形態では、燃料集合体全体の平均濃縮度は約 4 . 0 w t %、ガドリニア平均濃度は約 1 . 0 w t %である。

【 0 0 4 0 】

制御棒側領域 21 に配置される 34 本の燃料棒 1 ~ 3 の平均濃縮度は約 3 . 9 w t %であり、平均ガドリニア濃度は約 0 . 9 w t %である。これに対して、反制御棒側領域 22 に位置する燃料棒 34 本の燃料棒 1 ~ 3 の平均濃縮度は約 4 . 1 w t %、平均ガドリニア濃度は約 1 . 2 w t %と、いずれも制御棒側領域 21 よりも高く設定されていることは第 1 実施の形態と同じである。

【 0 0 4 1 】

第 1 の実施の形態と異なるのは、制御棒側領域 21 に配置するガドリニア入り燃料棒のウラン濃縮度を反制御棒側領域 22 に比べて低くしたことである。本実施の形態によれば、図 1 に示す第 1 実施の形態とほぼ同様な作用が得られ、炉心の熱的余裕を確保でき、高燃焼度化や運転サイクル長期化が可能となる。

【 0 0 4 2 】

図 9 は、本発明の第 5 実施の形態のBWR用燃料集合体の横断面図を示したものであり、制御棒側の水ギャップが反対側よりも広いいわゆるD格子タイプのBWRに適用した例である。D格子タイプは、十字型制御棒 6 を中心に 4 体の燃料集合体 83 が配置された制御棒セル内で隣り合う燃料集合体同士の間隙で制御棒が挿入される間隙 g_1 を、制御棒セル間で隣り合う燃料集合体同士の間隙で制御棒が挿入されない間隙 g_2 より大きくしたものである。このように制御棒が挿入される側の水ギャップ幅が反対側に比べて広いD格子プラントでは、制御棒を引き抜いたときの減速材分布が横断面における制御棒側に偏在したものになる。したがって本発明の作用は水ギャップ幅が両側で等しいC格子プラントと同じであるが、発明の効果はより大きくなる。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 3 】

図 1 0 に、本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。燃料集合体は、図 1 に示した第 1 実施の形態と同様に燃料棒 1 0 が 9 × 9 の正方形格子状に配置されている。

【 0 0 4 4 】

高濃縮度燃料棒 1 は、燃料有効長を軸方向に 2 4 ノードに分けた場合、上端の 2 / 2 4 及び下端の 1 / 2 4 に天然ウランを配置し、その間の 2 1 / 2 4 は濃縮度 4 . 9 w t % でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ウラン部のみにについて説明する。中濃縮度燃料棒 2 は濃縮ウラン部の濃縮度は 4 . 0 w t % でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒 3 は濃縮ウラン部の濃縮度は 3 . 0 w t % でガドリニアを含まない。超低濃縮度燃料棒 4 は濃縮ウラン部の濃縮度は 2 . 0 w t % でガドリニアを含まない。

10

【 0 0 4 5 】

高濃縮度部分長燃料棒 1 P は、他の燃料棒に比べ有効長が 1 5 / 2 4 と短く濃縮度は 4 . 9 w t % でガドリニアを含まない。中濃縮度部分長燃料棒 2 P は、他の燃料棒に比べ有効長が 1 5 / 2 4 と短く濃縮度は 4 . 9 w t % でガドリニアを含まない。

【 0 0 4 6 】

ガドリニア入り燃料棒 2 G はウラン濃縮度は 4 . 0 w t % でガドリニア濃度を 5 . 0 w t % としている。ガドリニア入り低濃縮度燃料棒 3 G はウラン濃縮度は 3 . 0 w t % でガドリニア濃度を 5 . 0 w t % としている。

【 0 0 4 7 】

本実施の形態では、燃料集合体全体の平均濃縮度は約 3 . 9 w t % 、ガドリニア平均濃度は約 1 . 0 w t % である。制御棒側領域 2 1 に配置される 3 4 本の燃料棒 1 ~ 3 の平均濃縮度は約 3 . 8 w t % であり、平均ガドリニア濃度は約 0 . 9 w t % である。一方、反制御棒側領域 2 2 に位置する燃料棒 3 4 本の燃料棒 1 ~ 3 の平均濃縮度は約 4 . 0 w t % 、平均ガドリニア濃度は約 1 . 2 w t % と、いずれも制御棒側領域 2 1 よりも高く設定されていることは第 1 実施の形態と同じである。

20

【 0 0 4 8 】

第 1 の実施の形態と異なるのは、最外周の燃料棒の濃縮度及びガドリニア入り燃料棒の濃縮度を反対側に比べて低くしたことである。本実施の形態によれば、D 格子プラントについて炉心の熱的余裕を確保でき、高燃焼度化や運転サイクル長期化が可能となる。

30

【 0 0 4 9 】

図 1 1 は、本発明の第 6 実施の形態の BWR 用燃料集合体の横断面図を示したものである。図 1 2 に、本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。

【 0 0 5 0 】

高濃縮度燃料棒 1 は、燃料有効長を軸方向に 2 4 ノードに分けた場合、上端の 2 / 2 4 及び下端の 1 / 2 4 に天然ウランを配置し、その間の 2 1 / 2 4 は濃縮度 4 . 9 w t % でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ウラン部のみにについて説明する。中濃縮度燃料棒 2 は濃縮ウラン部の濃縮度は 4 . 0 w t % でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒 3 は濃縮ウラン部の濃縮度は 3 . 0 w t % でガドリニアを含まない。

40

【 0 0 5 1 】

高濃縮度部分長燃料棒 1 P は、他の燃料棒に比べ有効長が 1 5 / 2 4 と短く濃縮度は 4 . 9 w t % でガドリニアを含まない。

【 0 0 5 2 】

ガドリニア入り燃料棒 2 G はウラン濃縮度は 4 . 0 w t % でガドリニア濃度を 5 . 0 w t % としている。ガドリニア入り上部低濃縮度燃料棒 5 G は、ガドリニア濃度を 5 . 0 w t % とし、燃料有効長の 1 5 / 2 4 より下部ではウラン濃縮度は 4 . 0 w t % 、1 5 / 2 4 よりも上部ではウラン濃縮度は 3 . 0 w t % としている。

【 0 0 5 3 】

下部ガドリニア入り上部低濃縮度燃料棒 6 G は、燃料有効長の 1 5 / 2 4 より下部ではウ

50

ラン濃縮度は4.0wt%でガドリニア濃度を5.0wt%、15/24よりも上部ではラン濃縮度は3.0wt%でガドリニアを含まない。

【0054】

本実施の形態では、燃料有効長の15/24より下部では制御棒側と反対側の平均濃縮度及び平均ガドリニア濃度を同一とし、15/24よりも上部の平均濃縮度及びガドリニア濃度を制御棒側領域21で反制御棒側領域22よりも低くしたことが特徴である。

【0055】

本実施の形態は、燃料寿命末期で燃料棒出力に及ぼす制御棒履歴の影響が問題となるのは燃料有効長の上部のみであることに着目したものである。上記の構成によれば、燃料寿命末期の熱的余裕は第1実施の形態と同様に増大でき、さらに、燃料寿命初期で制御棒側の出力が反対側に比べて大きくならないように工夫したものである。

10

【0056】

図13は、本発明の第7実施の形態のBWR用燃料集合体の横断面図を示したものである。燃料集合体は、燃料棒が9×9の正方格子状に配置されておりその中央部に水が流れる断面がほぼ正方形のウォータチャンネル9が1本配置されている。ウォータチャンネル9は、9本の燃料棒を配置可能な領域に設置されている。燃料集合体85はラン濃縮度又はガドリニア濃度の異なる5種類の燃料棒からなる。

【0057】

高濃縮度燃料棒1は、燃料有効長を軸方向に24ノードに分けた場合、上端の2/24及び下端の1/24に天然ランを配置し、その間の21/24は濃縮度4.9wt%でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ラン部のみについて説明する。中濃縮度燃料棒2は濃縮ラン部の濃縮度は4.0wt%でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒3は濃縮ラン部の濃縮度は3.0wt%でガドリニアを含まない。

20

【0058】

ガドリニア入り燃料棒2Gはラン濃縮度は4.0wt%でガドリニア濃度を5.0wt%としている。ガドリニア入り低濃縮度燃料棒3Gはラン濃縮度は3.0wt%でガドリニア濃度を5.0wt%としている。図14に、本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。

【0059】

本実施の形態では、制御棒側領域21に位置する燃料棒1～3の平均濃縮度及び平均ガドリニア濃度がいずれも制御棒側領域21よりも高く設定されていることは図7に示した第4実施の形態と同じであり、同様に炉心の熱的余裕を確保でき、高燃焼度化や運転サイクル長期化が可能となる。

30

【0060】

図15は、本発明の第8実施の形態のBWR用燃料集合体の横断面図を示したものである。燃料集合体は、燃料棒が10×10の正方格子状に配置されておりそのほぼ中央部に水が流れる断面がほぼ正方形のウォータチャンネル91が1本配置されている。ウォータチャンネル91は、9本の燃料棒を配置可能な領域に設置されている。燃料集合体86はラン濃縮度及びガドリニア濃度の異なる5種類の燃料棒からなる。

【0061】

高濃縮度燃料棒1は、燃料有効長を軸方向に24ノードに分けた場合、上端の2/24及び下端の1/24に天然ランを配置し、その間の21/24は濃縮度4.9wt%でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ラン部のみについて説明する。中濃縮度燃料棒2は濃縮ラン部の濃縮度は4.0wt%でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒3は濃縮ラン部の濃縮度は3.0wt%でガドリニアを含まない。超低濃縮度燃料棒4は濃縮ラン部の濃縮度は2.0wt%でガドリニアを含まない。

40

【0062】

高濃縮度部分長燃料棒1Pは、他の燃料棒に比べ有効長が15/24と短く濃縮度は4.9wt%でガドリニアを含まない。

【0063】

50

ガドリニア入り燃料棒 2Gはウラン濃縮度は4.0wt%でガドリニア濃度を5.0wt%としている。ガドリニア入り低濃縮度燃料棒 3Gはウラン濃縮度は3.0wt%でガドリニア濃度を5.0wt%としている。図16に、本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。

【0064】

本実施の形態では、ガドリニア入り燃料棒の平均濃縮度を制御棒側領域 21で反制御棒側領域 22に比べ低くしている。本実施の形態によれば、図7に示す第4実施の形態とほぼ同様な作用が得られ、炉心の熱的余裕を確保でき、高燃焼度化や運転サイクル長期化が可能となる。

【0065】

図17は、本発明の第9実施の形態のBWR用燃料集合体の横断面図を示したものである。図18に、本実施の形態の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニア濃度の分布を示す。

【0066】

高濃縮度燃料棒 1は、燃料有効長を軸方向に24ノードに分けた場合、上端の2/24及び下端の1/24に天然ウランを配置し、その間の21/24は濃縮度4.9wt%でガドリニアを含まない。その他の燃料棒については濃縮ウラン部のみについて説明する。中濃縮度燃料棒 2は濃縮ウラン部の濃縮度は4.0wt%でガドリニアを含まない。低濃縮度燃料棒 3は濃縮ウラン部の濃縮度は3.0wt%でガドリニアを含まない。

【0067】

高濃縮度部分長燃料棒 1Pは、他の燃料棒に比べ有効長が15/24と短く濃縮度は4.9wt%でガドリニアを含まない。

【0068】

ガドリニア入り燃料棒 2Gはウラン濃縮度は4.0wt%でガドリニア濃度を5.0wt%としている。

【0069】

ガドリニア入り上部低濃縮度燃料棒 5Gは、ガドリニア濃度を5.0wt%とし、燃料有効長の15/24より下部ではウラン濃縮度は4.0wt%、15/24よりも上部ではウラン濃縮度は3.0wt%としている。下部ガドリニア入り上部低濃縮度燃料棒 6Gは、燃料有効長の15/24より下部ではウラン濃縮度は4.0wt%でガドリニア濃度を5.0wt%、15/24よりも上部ではウラン濃縮度は3.0wt%でガドリニアを含まない。

【0070】

本実施の形態では、燃料有効長の15/24より下部では制御棒側と反対側の平均濃縮度及び平均ガドリニア濃度を同一とし、15/24よりも上部の平均濃縮度及びガドリニア濃度を制御棒側で反対側よりも低くしたことが特徴である。

【0071】

上記の構成によれば、図11に示した第6実施の形態とほぼ同様な作用が得られ、燃料寿命を通じて炉心の熱的余裕を増大できる。

【0072】

以上の実施の形態では、上端部、下端部の天然ウラン領域の長さをそれぞれ燃料有効長の2/24、1/24としたが、熱的余裕をさらに増大させるために、それぞれ1/24、1/24、または1/24、0/24などの組み合わせにすることも可能である。この場合は平均ウラン濃縮度を若干増加させる必要が生じる。

【0073】

【発明の効果】

本発明によれば、燃料集合体は、チャンネルファスナ側領域（言い換えれば制御棒側領域）にある複数の燃料棒の平均濃縮度及び平均ガドリニア濃度を、反対側領域（言い換えれば反制御棒側領域）のそれらよりも低く、かつ制御棒のコーナーに近い燃料棒位置（2, 2）、（2, 3）、（3, 2）にはガドリニア入り燃料棒を配置しない構成としたので、無

10

20

30

40

50

限増倍率は、燃料寿命初期から中期では制御棒側領域で反制御棒側領域よりも大きく、燃料寿命中期から末期では逆に反制御棒側領域で制御棒側領域よりも無限増倍率が大きくなり、したがって制御棒側領域の燃料棒は燃料寿命初期から中期にかけて燃焼が進むため、燃料寿命中期から末期で隣接する制御棒を運転中に挿入する場合、この制御棒を引き抜いたときの出力上昇が過大にならず、燃料寿命を通じて熱的余裕を確保でき、高燃焼度化または運転サイクル長期化が可能となり、BWRの経済性を一層向上できる。また熱的余裕の故に燃料棒に溶融や過度の歪が生じねることなく、燃料の機械的健全性を確保できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図2】図1の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

10

【図3】図1の燃料集合体の無限増倍率の燃焼度依存性を示す図。

【図4】本発明の第2実施の形態を示す炉心の燃料装荷パターンの横断面図。

【図5】本発明の第3実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図6】図5の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

【図7】本発明の第4実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図8】図7の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

【図9】本発明の第5実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図10】図9の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

【図11】本発明の第6実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図12】図11の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

20

【図13】本発明の第7実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図14】図13の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

【図15】本発明の第8実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図16】図15の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

【図17】本発明の第9実施の形態を示す燃料集合体の横断面図。

【図18】図17の燃料集合体の軸方向における濃縮度及びガドリニアの分布を示す図。

【図19】本発明による燃料集合体の一部切欠斜視図。

【符号の説明】

1, 2, 3, 4 ... 燃料棒

1P, 2P ... 部分長燃料棒

30

2G, 3G, 5G, 6G ... ガドリニア入り燃料棒

4 ... ウォータロッド

6 ... 制御棒

7 ... チャンネルボックス

8 ... 燃料集合体

9 ... ウォータチャンネル

10 ... 燃料棒

11 ... 制御棒セル

14a ... 上部タイプレート

14b ... チャンネルファスナ

40

14c ... スペーサ

14d ... 下部タイプレート

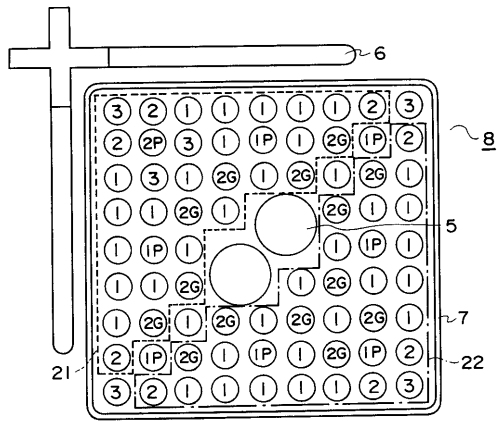
21 ... 制御棒側領域

22 ... 反制御棒側領域

81, 82, 83, 84, 85, 86, ... 燃料集合体

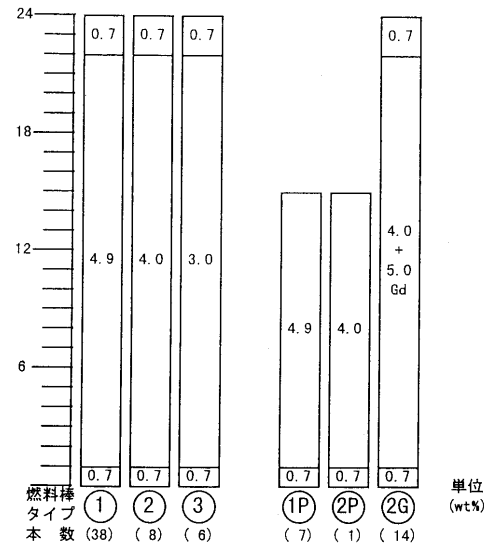
91 ... ウォータチャンネル

【図 1】

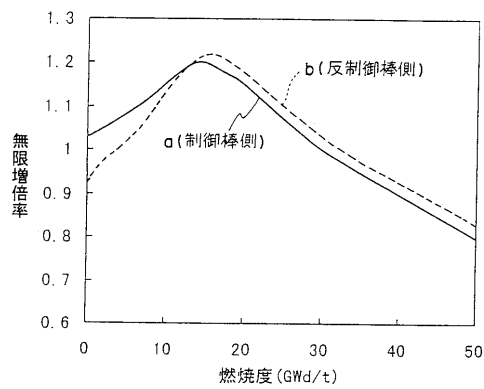


- 1 : 濃縮度 4.9%
 2 : 濃縮度 4.0%
 3 : 濃縮度 3.0%
 G : ガトリア入り
 6 : 制御棒
 8 : 燃料集合体
 21 : 制御棒側領域
 22 : 反射制御棒側領域

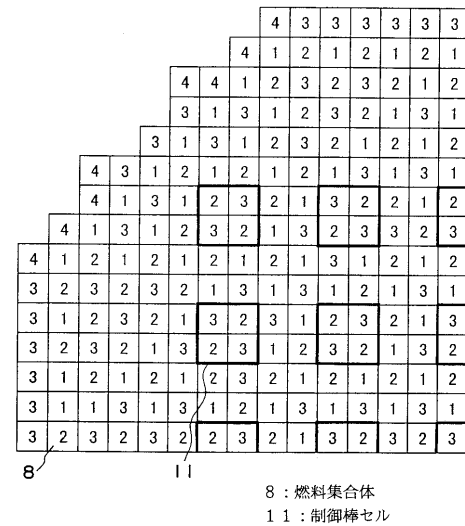
【図 2】



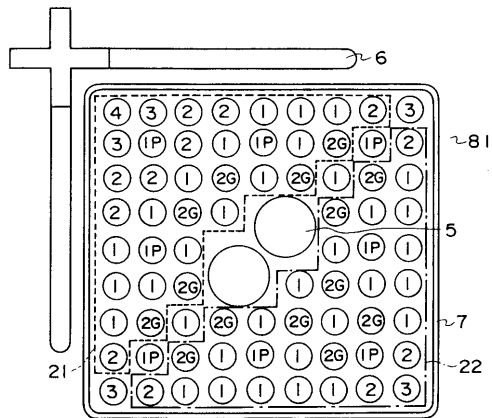
【図 3】



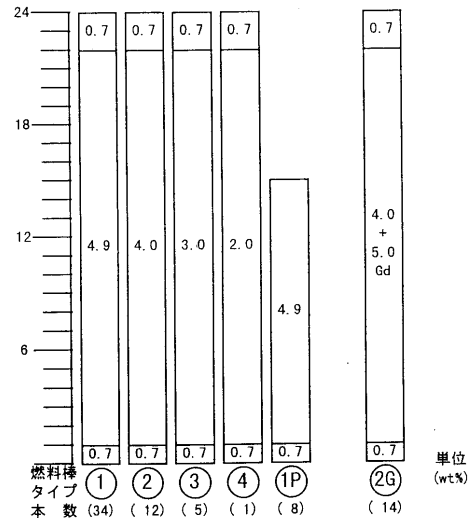
【図 4】



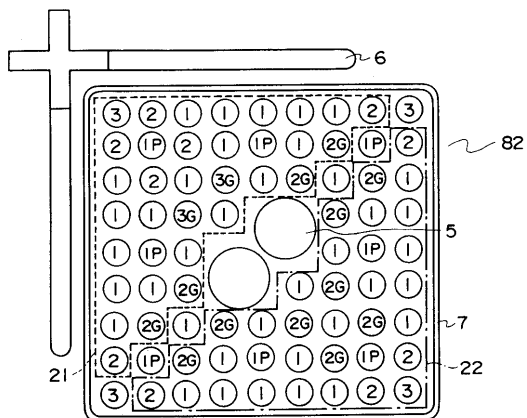
【図 5】



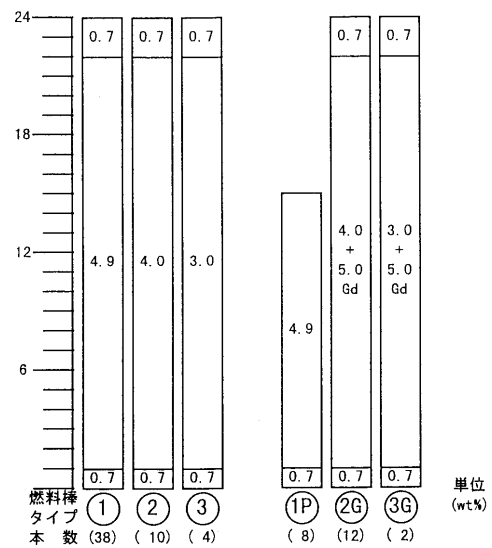
【図 6】



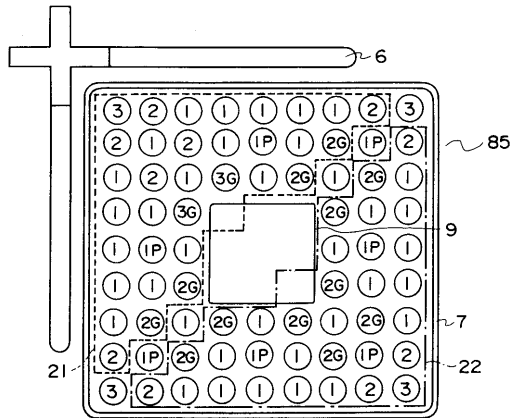
【図 7】



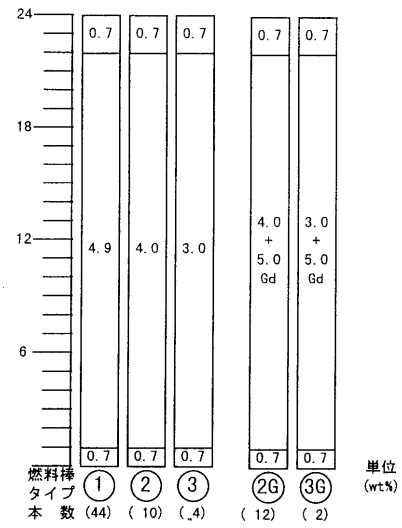
【図 8】



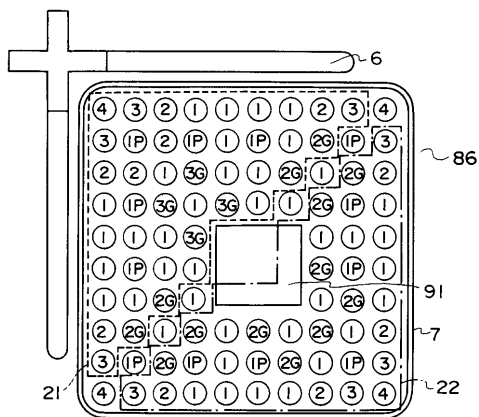
【図 13】



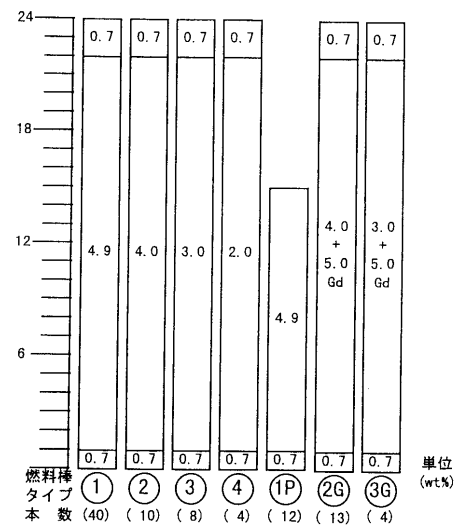
【図 14】



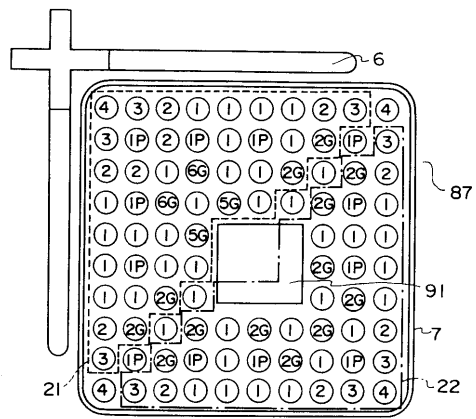
【図 15】



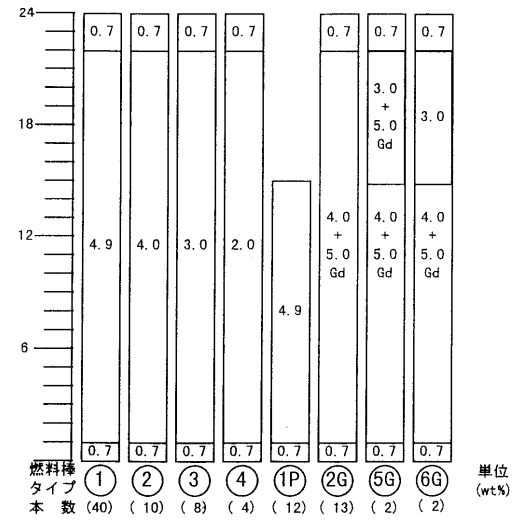
【図 16】



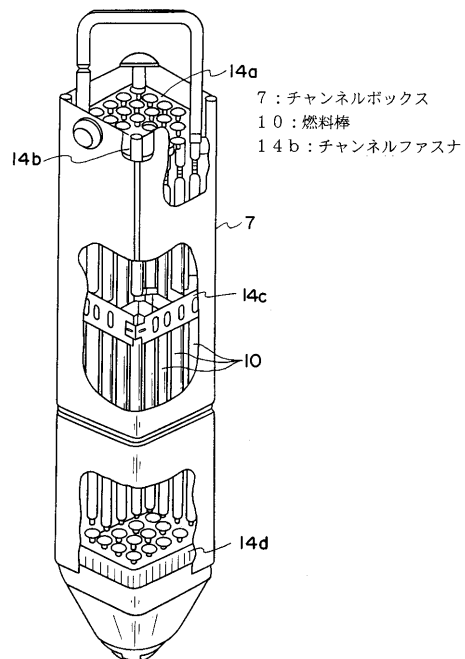
【図 17】



【図 18】



【図 19】



フロントページの続き

(72)発明者 小山 淳一

茨城県日立市大みか町七丁目2番1号
部内

株式会社 日立製作所 電力・電機開発本

審査官 今浦 陽恵

(56)参考文献 特開平07-209460(JP,A)
特開平08-189983(JP,A)
特開平04-050796(JP,A)
特開平11-211870(JP,A)
特開昭55-070792(JP,A)
特開昭62-012890(JP,A)
特開昭61-178693(JP,A)
特開昭56-070489(JP,A)
特開昭56-037589(JP,A)
特開昭55-156890(JP,A)
特開2000-193773(JP,A)
実開昭57-171599(JP,U)
特開昭62-044684(JP,A)
特開昭56-125689(JP,A)
特開平03-107793(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G21C 3/30