

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2012年8月16日(16.08.2012)



(10) 国際公開番号
WO 2012/108238 A1

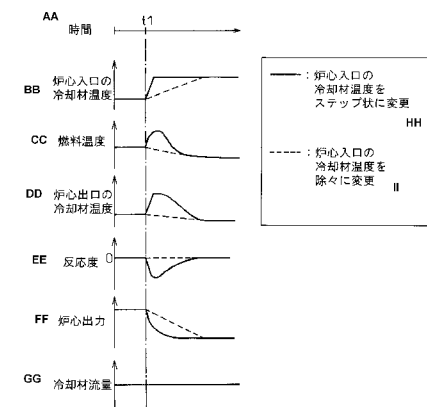
- (51) 国際特許分類:
G21C 7/30 (2006.01) G21C 5/00 (2006.01)
G21C 3/328 (2006.01) G21C 5/18 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/050972
- (22) 国際出願日: 2012年1月18日(18.01.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2011-027483 2011年2月10日(10.02.2011) JP
特願 2011-030850 2011年2月16日(16.02.2011) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 国立
大学法人東京工業大学(Tokyo Institute of Techno-
logy) [JP/JP]; 〒1528550 東京都目黒区大岡山2-
1 2-1 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 関本 博
(SEKIMOTO, Hiroshi) [JP/JP]; 〒1528550 東京都目
黒区大岡山2-1 2-1 国立大学法人東京工
業大学内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 青木 篤, 外(AOKI, Atsushi et al.); 〒 添付公開書類:
1058423 東京都港区虎ノ門三丁目5番1号 虎 — 国際調査報告(条約第21条(3))
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,
BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,
GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS,
KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT,
LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA,
RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV,
SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC,
VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,
MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシ
ア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨー
ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC,
MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),
OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML,
MR, NE, SN, TD, TG).

(54) Title: NUCLEAR REACTOR AND POWER GENERATION FACILITY

(54) 発明の名称: 原子炉および発電設備

[図12]

図12



AA Time
 BB Temperature of cooling material at inlet opening of reactor core
 CC Temperature of fuel
 DD Temperature of cooling material at outlet opening of reactor core
 EE Reactivity
 FF Reactor core output
 GG Flow amount of cooling material
 HH Temperature of cooling material at inlet opening of reactor core is changed stepwisely
 II Temperature of cooling material at inlet opening of reactor core is changed gradually

(57) Abstract: A nuclear reactor is equipped with a reactor core, wherein the reactor core comprises a new fuel section which contains uranium and a combustion section in which a fuel is combusted, and wherein the reactor core can generate an output upon the occurrence of nuclear division of plutonium and moves in the direction to which the combustion section moves toward the new fuel section during the period between the initial stage and the end stage of the driving cycle. The nuclear reactor is also equipped with a reactivity insertion mechanism which can insert a reactivity that can alter the output from the reactor core when the temperature of the cooling material that flows in the reactor core is changed, and the reactivity insertion mechanism performs such a control procedure that the temperature of the cooling material that flows in the reactor core can be changed in accordance with the change in output required for the reactor core.

(57) 要約: 原子炉は、ウランを含む新燃料部と、燃料が燃焼する燃焼部とを備え、プルトニウムが核分裂することにより出力を発生し、運転サイクルの初期から末期にかけて、燃焼部が新燃料部に向かう方向に移動する炉心を備える。原子炉は、炉心内を流れる冷却材の温度が変化したときに、炉心の出力を変更可能な反応度が印加される反応度印加機構を備えており、炉心に要求される出力の変化に応じて炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる制御を行う。

WO 2012/108238 A1

明 細 書

発明の名称：原子炉および発電設備

技術分野

[0001] 本発明は、原子炉および発電設備に関する。

背景技術

[0002] 原子炉は、発電設備等に用いられている。原子炉は、高速中性子炉を含む。高速中性子炉は、主に高速中性子により核分裂性核種を核分裂させて出力を発生する原子炉であり、ナトリウム、鉛ビスマス合金等の重金属、またはガス等により炉心が冷却される。従来の技術の原子炉では、炉心全体で核分裂が生じるとともに出力が発生する。

[0003] 原子炉の炉心の臨界の維持および出力の調整は、例えば制御棒によって行われる。制御棒は、中性子を吸収しやすい物質で形成されている。運転サイクルの初期には制御棒を炉心に挿入しておき、燃焼が進むとともに徐々に制御棒を引き抜くことにより、出力を維持しながら臨界状態を保っている。このように、原子炉の運転においては、原子炉の臨界を維持するための制御が必要である。運転サイクルの初期から運転サイクルの末期まで継続的に臨界の維持のための制御を行っている。

[0004] 特許第3463100号公報においては、運転サイクルで臨界を維持するための制御が不要な原子炉が開示されている。この原子炉は、CANDLE (Constant Axial Shape of Neutron Flux, Nuclide Densities and Power Shape During Life of Energy Production) 燃焼法と呼ばれる燃焼法を採用している。CANDLE燃焼法では、炉心をおおよそ新燃料部、燃焼部、燃焼が進んだ部分に分けることができる。燃焼部は、燃焼とともに、出力に比例した速さで新燃料部に向かって移動する。CANDLE燃焼では、一つの運転サイクルが終了した後、次の運転サイクルを行なうために燃料を交換する。燃料を交換するときには、炉心軸の方向において燃焼の進んだ燃料を取り出し、取り出した側の端部と反対側の端部に新燃料を装荷することができる

。

[0005] CANDLE 燃焼法では、臨界調整を行わなくてもよく、また、出力分布の調整をしなくても出力分布が、ほぼ一定に保たれる。このため、運転サイクルの初期から末期にわたって、制御棒の操作等のような炉心の反応度制御は行わなくても良いという特徴を有する。また反応度係数も変化せずに、燃焼とともに運転方法を変化させなくても良いという特徴を有する。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特許第3463100号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 原子炉の燃料の燃焼法としてCANDLE 燃焼法を採用することにより、燃焼が進行しても炉心特性をほぼ一定にすることができて運転制御が簡単になり、事故の発生確率が低い原子炉を提供することができる。また、炉心に制御棒を配置しなくても良いために、運転期間中に制御棒が誤って引き抜かれるような事故の可能性が全くなくなる。また、燃料を取り出すときの燃焼度が高いことから、廃棄物の量を低減できる。

[0008] CANDLE 燃焼法では、第2サイクル以降の新燃料として、天然ウランまたは劣化ウランだけを用いて運転を行なうことができる。これらの燃料は、未臨界であることから輸送や貯蔵が容易になる。また、濃縮や再処理を行わずに、ウランのおよそ40%をエネルギーとして利用できることから、資源の有効利用ができる。また、第2サイクル以降の新燃料は、濃縮や再処理等が不要となることから、核拡散抵抗性が高いなどの特徴を有する。

[0009] 原子炉は、発電設備や船舶等に配置される。原子炉は、運転期間中に要求される熱量に応じて出力が変更される場合がある。たとえば、発電設備においては、発電電力に対応して炉心の出力が変更される。従来の技術の原子炉においては、たとえば制御棒を炉心の内部に挿入したり引き抜いたりするこ

とにより炉心の出力の制御を行っている。

[0010] CANDL 燃焼法を採用した炉心を備える原子炉においても、炉心に挿入する制御棒を配置することにより、炉心の出力を調整することができる。しかしながら、CANDLE 燃焼法では、制御棒を挿入するための流路（チャンネル）を炉心に形成すると、臨界を達成するのが困難になる場合がある。従来技術における炉心では、核分裂性のウランの濃度またはプルトニウムの濃度を大きくしたり、新燃料の燃料集合体の数を増加したりすることにより臨界を容易に達成することができた。CANDLE 燃焼法においても濃縮ウラン等を新燃料に含めることができるが、濃縮ウラン等を使用せずに天然ウランまたは劣化ウランのみを新燃料として使用することが好ましい。

[0011] また、燃料を均一に燃焼させるには、径方向の出力分布が略一定であることが好ましい。ところが、制御棒を挿入するための流路を炉心に形成すると、炉心に燃料が装荷されていない空間が形成される。この空間においては、出力密度が小さくなってしまい、径方向出力分布が不均一になるという問題が生じる。

[0012] 本発明は、燃料の燃焼とともに燃焼部が新燃料部に向かって移動する炉心を備え、制御棒を用いなくても出力調整を行うことができる原子炉およびこの原子炉を備える発電設備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

[0013] 本発明の原子炉は、新燃料が装荷されている新燃料部と、新燃料部の一方の側に配置され、中性子を発生して燃料が燃焼する燃焼部とを備え、新燃料は天然ウランおよび劣化ウランのうち少なくとも一方のウランを含み、ウランが中性子を吸収して生成されたプルトニウムが核分裂することにより出力を発生し、運転サイクルの初期から末期にかけて、燃焼部がほぼ一定の形状を保ちながら新燃料部に向かう方向に移動する炉心を備える。原子炉は、炉心内を流れる冷却材の温度が変化したときに、炉心の出力を変更可能な反応度が印加される反応度印加機構を備えており、炉心に要求される出力の変化に応じて炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる制御を行うことにより、

炉心の出力が調整される。

- [0014] 上記発明においては、反応度印加機構は、燃料棒または燃料集合体を含む燃料体と、運転サイクルの初期に燃焼部に含まれる領域に配置され、複数の燃料体同士を互いに支持し、燃料体同士の間隔を定める間隔調整部材とを含み、間隔調整部材は、温度が上昇すると膨張する材質で形成されており、炉心内の冷却材の温度が上昇したときに間隔調整部材が膨張し、燃料体同士の間隔が大きくなることが好ましい。
- [0015] 上記発明においては、炉心は、炉心入口から炉心出口に向かって冷却材の温度が上昇する高上昇率領域と、高上昇率領域よりも下流に配置され、高上昇率領域よりも温度の上昇率が小さくなる低上昇率領域とを有し、間隔調整部材は、運転サイクルの初期において低上昇率領域に配置されていることが好ましい。
- [0016] 上記発明においては、間隔調整部材は、穴部を有する間隔調整板を含み、複数の燃料体は、穴部に支持されていることができる。
- [0017] 上記発明においては、炉心に流入する冷却材の温度を変化させる冷却材温度調整制御を行うことにより、炉心内を流れる冷却材の温度を変化させることが好ましい。
- [0018] 上記発明においては、炉心に流入する冷却材の流量が変化したときに、炉心内を流れる冷却材の温度が変化し、炉心の出力を変更可能な反応度が印加されるように形成されており、炉心に流入する冷却材の流量を変化させる冷却材流量調整制御を行うことにより、炉心内を流れる冷却材の温度を変化させることが好ましい。
- [0019] 上記発明においては、冷却材は、鉛の同位体のうち鉛208が主成分であることが好ましい。
- [0020] 本発明の発電設備は、上記の原子炉と、炉心により生じる熱により水蒸気を生成する蒸気発生器と、蒸気発生器にて生成された水蒸気が供給されて回転するタービンと、タービンに接続されている発電機とを備える。

発明の効果

[0021] 本発明によれば、燃料の燃焼とともに燃焼部が新燃料部に向かって移動する炉心を備え、制御棒を用いなくても出力調整を行うことができる原子炉およびこの原子炉を備える発電設備を提供することができる。

図面の簡単な説明

- [0022] [図1]実施の形態1における発電設備の概略図である。
[図2]実施の形態1における炉心の4分の1の概略平面図である。
[図3]実施の形態1における燃料集合体の概略斜視図である。
[図4]実施の形態1における燃料棒の概略斜視図である。
[図5]実施の形態1における炉心の燃料の燃焼状態を説明する概略図である。
[図6]実施の形態1における燃料の中性子フルエンスに対する無限中性子増倍率の変化を説明するグラフである。
[図7]炉心高さとの燃料の無限中性子増倍率との関係を説明するグラフである。
[図8]実施の形態1における炉心の出力密度の変化および燃料の取換えを説明する図である。
[図9]実施の形態1における炉心の概略部分断面図である。
[図10]実施の形態1における間隔調整部材の拡大概略平面図である。
[図11]実施の形態1における炉心の他の概略部分断面図である。
[図12]実施の形態1における冷却材温度調整制御のタイムチャートである。
[図13]鉛の同位体の非弾性散乱断面積のグラフである。
[図14]実施の形態2における冷却材流量調整制御のタイムチャートである。

発明を実施するための形態

[0023] (実施の形態1)

図1から図13を参照して、実施の形態1における原子炉および発電設備について説明する。本実施の形態における原子炉の炉心は、主に高速中性子によりプルトニウムの核分裂を発生させる高速中性子炉である。本実施の形態における原子炉は、発電設備に配置されており、原子炉から流出する冷却材の熱を用いて発電を行なっている。

[0024] 図1は、本実施の形態における発電設備の概略図である。本実施の形態に

おける発電設備は、原子炉 1 を備える。原子炉 1 は、原子炉容器 9 と原子炉容器 9 の内部に配置されている炉心 10 とを含む。炉心 10 には、燃料が装荷されている。本実施の形態における炉心 10 は、鉛直方向が炉心の軸方向に相当する。原子炉 1 の内部には冷却材が供給され、炉心 10 の内部を冷却材が流れることにより、炉心 10 の熱が冷却材に伝達される。

[0025] 本実施の形態における冷却材は、中性子の減速能力や中性子の吸収能力が小さな材料を用いることができる。本実施の形態においては、冷却材として液体のナトリウム 51 が用いられている。原子炉の冷却材としては、ナトリウム冷却材の他に、鉛-ビスマス冷却材等の鉛系冷却材や、ヘリウム等のガス冷却材等を用いることができる。また、本実施の形態においては、中間熱交換器 2 から蒸気発生器 3 に熱を伝達する熱媒体としても液体のナトリウム 52 が用いられている。

[0026] 発電設備は、炉心 10 を流れる冷却材の熱を用いて、タービン 4 を回転させる蒸気を生成するための中間熱交換器 2 および蒸気発生器 3 を備える。冷却材の熱は、中間熱交換器 2 を介して蒸気発生器 3 に伝達される。

[0027] ポンプ 41 を駆動することにより、冷却材として機能する 1 次系のナトリウム 51 は、矢印 112 に示すように原子炉容器 9 の内部に流入する。冷却材は、炉心 10 の内部を流通することにより温度が上昇する。温度が上昇した冷却材は、矢印 111 に示すように、中間熱交換器 2 に送られる。冷却材は、中間熱交換器 2 にて熱交換を行なった後に、ポンプ 41 により原子炉容器 9 の内部に供給される。

[0028] 中間熱交換器 2 から蒸気発生器 3 に熱を伝達する 2 次系のナトリウム 52 は、ポンプ 42 が駆動することにより、矢印 114 に示すように中間熱交換器 2 に供給される。2 次系のナトリウム 52 は、冷却材と熱交換を行って温度が上昇する。温度が上昇した 2 次系のナトリウム 52 は、矢印 113 に示すように、蒸気発生器 3 に供給される。

[0029] 本実施の形態における蒸気発生器 3 は、2 次系のナトリウム 52 の熱により水 53 を加熱する。ポンプ 43 が駆動することにより、矢印 116 に示す

ように蒸気発生器 3 に水が供給される。蒸気発生器 3 において、2 次系のナトリウム 5 2 と水とが熱交換を行なうことにより水蒸気が生成される。蒸気発生器 3 において熱交換を行った 2 次系のナトリウム 5 2 は、ポンプ 4 2 により中間熱交換器 2 に供給される。

[0030] 本実施の形態における発電設備は、タービン 4 よび発電機 5 を備える。蒸気発生器 3 にて生成された水蒸気は、流量調整弁 4 4 を通って、矢印 1 1 5 に示すようにタービン 4 に供給される。流量調整弁 4 4 の開度を調整することにより、タービンに供給する蒸気流量を調整することができる。水蒸気は、タービン 4 を回転させる。タービン 4 の回転力が発電機 5 に伝達されることにより、発電機 5 が発電する。

[0031] タービン 4 から流出する水蒸気および凝縮水は、復水器 6 に流入する。復水器 6 は、熱交換器 6 a を含む。熱交換器 6 a には、矢印 1 1 8 に示すように海水等の冷却水が供給されている。水蒸気は、復水器 6 において水 5 3 に戻される。復水器 6 から流出する水 5 3 は、ポンプ 4 3 により、蒸気発生器 3 に供給される。

[0032] 図 2 に、本実施の形態における原子炉の炉心の概略平面図を示す。図 2 は、炉心の 4 分の 1 を示している。本実施の形態における炉心 1 0 は、平面形状がほぼ正六角形状に形成されている。原子炉の炉心は、この形態に限られず、平面視したときに、ほぼ円形となる任意の形状または円形に形成することができる。

[0033] 本実施の形態における炉心 1 0 は、燃料体としての燃料集合体 2 1 を含む。本実施の形態においては、複数の燃料集合体 2 1 が規則的に配列されている。本実施の形態における複数の燃料集合体 2 1 には、同一の新燃料が装荷されている。本実施の形態においては、新燃料として劣化ウランが装荷されている。本実施の形態における炉心 1 0 の周りには、反射体が配置されていないが、この形態に限られず、炉心 1 0 の周りに反射体が配置されていても構わない。

[0034] 図 3 に、本実施の形態における燃料集合体の概略斜視図を示す。燃料集合

体 2 1 は、複数の燃料棒 2 2 を含む。燃料棒 2 2 は、長手方向の端部がノズル 2 7 により支持されている。または、燃料棒 2 2 は、燃料集合体 2 1 の内部に配置され、ノズル 2 7 に固定されている固定部材により支持されている。また、燃料棒 2 2 は、複数の支持格子 2 5 a, 2 5 b により支持されている。支持格子 2 5 a, 2 5 b は、燃料棒 2 2 同士を互いに離して支持している。冷却材は、燃料棒 2 2 同士の間を流れて燃料棒 2 2 を冷却する。本実施の形態では支持格子により燃料棒同士の間隔を保っているが、この形態に限られず、支持格子の代わりにワイヤースペース等を用いることができる。

[0035] 図 4 に、本実施の形態における燃料棒の概略斜視図を示す。図 4 では、燃料の燃焼が上側から下側に向かって移動する燃料棒を示している。また、被覆材の一部を破断して示している。本実施の形態における燃料棒 2 2 は、被覆材 2 3 を含む。被覆材 2 3 は、筒状に形成されている。被覆材 2 3 は、たとえばステンレス鋼で形成されている。燃料棒 2 2 は、燃料ペレット 2 4 a, 2 4 b, 2 4 c を含む。燃料ペレット 2 4 a, 2 4 b, 2 4 c は、被覆材 2 3 の内部に配置されている。燃料棒 2 2 は、栓 2 9 により封止されている。燃料ペレット 2 4 a, 2 4 b, 2 4 c は、コイルスプリング 2 8 により押圧されている。

[0036] 図 4 に示す燃料棒は、運転サイクルの初期の状態を示している。複数の燃料ペレット 2 4 a, 2 4 b, 2 4 c は、新燃料を含む燃料ペレット 2 4 a、燃焼途中の燃料ペレット 2 4 b、および燃焼が十分に進んだ燃料ペレット 2 4 c の順に配置されている。新燃料を含む燃料ペレット 2 4 a の部分により、炉心の新燃料部が画定される。燃焼途中の燃料ペレット 2 4 b の部分により、炉心の燃焼部が画定される。燃焼が進んだ燃料ペレット 2 4 c の部分により、炉心の燃焼が進んだ部分が画定される。

[0037] このように、本実施の形態における燃料棒 2 2 には、燃焼度が互いに異なる燃料ペレット 2 4 a, 2 4 b, 2 4 c が配置されている。一つの運転サイクルが終了した後には、たとえば、被覆材 2 3 を剥ぎ取り、燃焼が進んだ部

分の燃料ペレットとそれ以外の燃料ペレットとを分離する。次に、新たな被覆材の内部に、新燃料を含む燃料ペレットおよび回収された燃料ペレット等を配置することにより、次の運転サイクルのための燃料棒を形成することができる。

[0038] または、燃料ペレットの回収方法としては、それぞれの部分ごとに燃料棒を切断した後に、被覆材 2 3 を剥ぎ取っても構わない。この方法によっても、燃焼部および燃焼が進んだ部分に配置されていた燃料ペレットを回収することができる。

[0039] 図 2 から図 4 を参照して、本実施の形態における燃料集合体 2 1 の新燃料部に配置される燃料ペレットは、劣化ウランを含む。本実施の形態における燃料は、金属燃料であるが、この形態に限られず、例えば、窒化物燃料等を用いることができる。

[0040] 次に、本実施の形態における炉心の出力運転について説明する。本実施の形態においては、出力運転中に出力がほぼ一定に保たれる例について説明する。

[0041] 図 5 に、本実施の形態における炉心の燃焼の進行状況を説明する模式図を示す。図 5 は、炉心を軸方向に沿って切断したときの概略断面図である。図 5 は、複数回の運転サイクルを行なった後の第 n サイクルの初期 (BOC) の炉心と、第 n サイクルの末期 (EOC) の炉心とを示している。また、同一のサイクル長さおよび同一の燃料取替え方法で複数サイクル運転を行なった炉心を示している。径方向の位置 r が零の軸が炉心軸である。

[0042] 本実施の形態における原子炉の炉心 1 0 は、運転サイクルの初期から末期にかけて燃焼部 1 2 が、新燃料部 1 1 に向けて移動する。すなわち、本実施の形態における炉心は、CANDLE 燃焼を行なう。燃焼部 1 2 の移動する速度は、凡そ出力密度に比例し、燃料原子数密度に反比例する。

[0043] 本実施の形態における炉心の出力密度は、炉心の中央において高くなる。炉心の外周においては、中性子の漏れが多くなるために、径方向の外側に向かうほど出力密度が小さくなる。このため、燃焼部の軸方向の位置は、径方

向の外側に向かうほど遅れた位置に配置される。

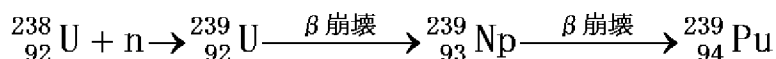
[0044] 本実施の形態における炉心10は、新燃料部11、燃焼部12および燃焼が進んだ部分13を含む。新燃料部11は、新燃料が配置されている部分である。燃焼部12は、自発的に中性子が発生し、燃料の燃焼が生じる部分である。燃焼部12では、核分裂が発生することにより実質に出力が生じている。燃焼が進んだ部分13は、燃焼が進んで、ほとんど出力を発生していない部分である。

[0045] 第nサイクルの初期の炉心において、新燃料部11は、炉心10の下部に配置されている。燃焼部12は、新燃料部11の上側に配置されている。燃焼部12には、前サイクルで既に燃焼が始まっていた燃料が配置されている。

[0046] 本実施の形態においては、運転サイクルの初期に配置された燃焼部12は、燃焼を開始する部分になる。燃焼部12から燃料の燃焼が開始され、矢印101に示すように、新燃料部11に向かう方向に燃焼が進行する。第nサイクルの燃焼が進行して運転サイクルの末期になった場合には、燃焼部12が炉心10の下端まで進行する。本実施の形態においては、新燃料部11がほとんどなくなるまで燃焼を継続している。運転サイクルの末期では、新燃料部11が残っていても構わない。

[0047] 図6に、本実施の形態における燃料の中性子フルエンスと無限中性子増倍率との関係を説明するグラフを示す。横軸が、中性子束を時間で積分した中性子フルエンスであり、縦軸が無限中性子増倍率 k_{inf} である。中性子フルエンスは、たとえば燃料の燃焼度に対応する量である。本実施の形態においては劣化ウランを燃料としている。劣化ウランは、たとえば、約99.8%のウラン238と、約0.2%のウラン235とを含む。ウラン238は、中性子を吸収することにより次の数1のように核変換する。ウラン238は、プルトニウム239に変換される。

[数1]



- [0048] 中性子フルエンスが零の近傍では、ウラン238が中性子を吸収してプルトニウム239が生成されることにより、無限中性子増倍率が上昇する。所定の中性子フルエンスに達すると、プルトニウム239等の存在量のウラン238の存在量に対する比が一定に近づき、更に核分裂生成物（FP）が蓄積して、無限中性子増倍率が徐々に減少する。このように、本実施の形態における燃料は、燃焼の初期において無限中性子増倍率が増加し、その後徐々に無限中性子増倍率が減少する特性を有する。
- [0049] また、劣化ウランの未臨界度は大きいために、炉心の一部分を臨界以上にするためには、多くの中性子をウラン238に吸収させる必要がある。本実施の形態においては、このような条件を満たすように炉心の大きさを選定するとともに燃料集合体や燃料棒を設計している。
- [0050] 上記のような炉心の構成を採用することにより、CANDLE燃焼を実施することができる。すなわち、炉心の径方向の全体にわたって出力が生じ、炉心の軸方向の一部の領域において燃焼部が生成される炉心を形成することができる。
- [0051] 図7に、炉心高さを無限大にして燃焼を行なっているときの無限中性子増倍率のグラフを示す。横軸が炉心高さであり、縦軸が燃料の無限中性子増倍率を示している。本実施の形態においては、矢印101に示すように、燃焼部が新燃料部に向かって移動する。燃焼部は、無限中性子増倍率が1を超える領域を含む。実際の原子炉の炉心の高さは有限であり、この場合には、炉心の端部での無限中性子増倍率は、図7に示すグラフから僅かにずれる場合がある。
- [0052] 図8に、本実施の形態における炉心の燃焼が進行する状態および燃料取り換えを説明するグラフを示す。図8には、第nサイクルの炉心の初期および末期のグラフと、第(n+1)サイクルの炉心の初期および末期のグラフが示されている。それぞれのグラフにおいては、炉心軸における出力密度、ウラン238の数密度および核分裂生成物の数密度が示されている。
- [0053] 図7および図8を参照して、出力密度の最大点は、矢印101に示すよう

に、新燃料部 11 が配置されている炉心下部に向けて移動する。本実施の形態における燃焼は、炉心の上端から下端に向かう方向に移動する。燃焼部が移動していく速度、すなわち、出力密度の最大点が移動する速度は、例えば、1 年間に数 cm である。このように、ゆっくりと燃焼部が移動する。ウラン 238 の数密度は、核変換されることにより燃焼部の下流側で小さくなる。また、核分裂生成物の数密度は、核分裂が生じることにより燃焼部の下流側で大きくなる。本実施の形態においては、燃焼部が、炉心のほぼ下端に達したときに燃焼を終了している。

[0054] 第 n サイクルが終了すると燃焼が進んだ部分の一部の燃料を取り出す。第 $(n+1)$ サイクルの初期の炉心では、矢印 117 に示すように、第 n サイクルにおいて炉心の下部に配置されている燃焼部を炉心の上部に配置して、燃焼を開始する部分として使用する。第 $(n+1)$ サイクルの炉心においては、炉心の下部に新たな新燃料部 11 を配置する。このような燃料交換を行なうことにより、第 $(n+1)$ サイクルの炉心においても、第 n サイクルの炉心と同様の燃焼を行なうことができる。

[0055] 図 9 に、本実施の形態における炉心の概略部分断面図を示す。本実施の形態における炉心 10 は、バッフル板 34 の内部に配置されている。燃料集合体 21 は、長手方向が炉心 10 の軸方向とほぼ平行になるように配置されている。本実施の形態における原子炉 1 は、炉心内を流れる冷却材の温度が変化したときに、炉心 10 の出力を変更可能な反応度が印加される反応度印加機構を備える。

[0056] 炉心 10 の下端部には、集合体下端支持部材 32 が配置されている。燃料集合体 21 の下端は、集合体下端支持部材 32 に固定されている。集合体下端支持部材 32 は、燃料集合体 21 を固定すればよいために、構造材として優れた材質を採用することができる。炉心 10 の上端部には、集合体上端支持部材 33 が配置されている。集合体上端支持部材 33 は、燃料集合体 21 の上端を移動可能に支持するように形成されている。燃料集合体 21 の上端は、外側に向かって移動可能なように集合体上端支持部材 33 に支持されて

いる。

[0057] 本実施の形態における炉心10は、複数の燃料集合体21同士を互いに支持する間隔調整部材としての間隔調整板31を備える。間隔調整板31は、複数の支持格子25a、25bのうち、支持格子25aの部分に配置されている(図3参照)。間隔調整板31が配置されていない部分においては、互いに隣り合う燃料集合体21の支持格子25b同士の間には隙間が形成されている。

[0058] 図10に、本実施の形態における間隔調整板の概略平面図を示す。図9および図10を参照して、間隔調整板31は、燃料集合体21が挿入される穴部31aを有する。間隔調整板31の穴部31aは、燃料集合体21の支持格子25aに嵌合するように形成されている。本実施の形態における間隔調整板31は、炉心10に含まれる全ての燃料集合体21を支持するように形成されている。穴部31aに、燃料集合体21の支持格子25aが配置されることにより、隣り合う燃料集合体21同士を互いに拘束することができる。複数の燃料集合体21同士の間隔が定められる。

[0059] 本実施の形態における間隔調整板31は、温度が上昇すると膨張する材質により形成されている。間隔調整板31は、熱膨張率が大きな材質にて形成されている。また、本実施の形態における間隔調整板31は、集合体下端支持部材32よりも熱膨張率の大きな材質にて形成されている。熱膨張率の大きな材質としては、ステンレス鋼を例示することができる。たとえば、ニッケルを8~10.5%、クロムを18~20%含むステンレス鋼SUS304(日本工業規格(JIS)に基づく)または、ニッケルを10~14%、クロムを16~18%、モリブデンを2~3%含むステンレス鋼SUS316(日本工業規格(JIS)に基づく)を採用することができる。

[0060] 図9には、炉心の概略図に加えて、炉心の軸方向の出力密度および冷却材温度が示されている。実線により運転サイクルの初期(BOC)の状態が示されており、破線により運転サイクルの末期(EOC)の状態が示されている。出力密度の分布および冷却材温度の分布は、運転サイクルの初期から末

期にかけて、矢印101に示すように、炉心の下端に向かって移動する。冷却材の温度は、炉心10の下端から上端に向かうにつれて上昇している。

[0061] 本実施の形態における間隔調整板31は、運転サイクルの初期に燃焼部の領域に配置されている。特に、本実施の形態においては、運転サイクルを通して燃焼部の領域に配置されている。すなわち、間隔調整板31は、運転サイクルの初期においても末期においても、燃焼部の領域の内部に配置されている。間隔調整板31は、運転サイクルの期間中を通して冷却材の温度が高くなる領域に配置されている。

[0062] 更に、本実施の形態における間隔調整板31は、炉心の軸方向において、運転サイクルの初期に出力密度がほぼ最大になる位置に配置されている。または、本実施の形態における間隔調整板31は、運転サイクルの初期において、炉心入口から炉心出口に向かう方向の冷却材の温度上昇が緩やかになった位置に配置されている。

[0063] 図11に、本実施の形態における炉心の他の概略部分断面図を示す。炉心10においては、冷却材が間隔調整板31に接触する。このため、冷却材の温度上昇に伴って、間隔調整板31の温度も上昇する。間隔調整板31は、温度が上昇すると矢印120に示すように、径方向の外側に向かって膨張する。

[0064] 燃料集合体21は、間隔調整板31により拘束されている。また、本実施の形態の炉心10は、燃料集合体21の下端が集合体下端支持部材32に固定されている。間隔調整板31が膨張すると、矢印121に示すように、燃料集合体21の上端が径方向の外側に向かう。それぞれの燃料集合体21の上端の移動距離は、炉心軸($r=0$)を中心として、径方向の外側に向かうにつれて徐々に大きくなる。

[0065] このように、冷却材の温度が上昇すると、それぞれの燃料集合体21同士の間隔が大きくなるために中性子の漏れが多くなる。炉心10の実効中性子増倍率を1未満にすることができて、炉心10に印加される反応度を負にすることができる。すなわち、本実施の形態における炉心10では、冷却材の

温度が上昇したときには負の反応度が印加される。

[0066] また、冷却材の温度が低下したときには、それぞれの燃料集合体 2 1 同士の間隔が小さくなるために中性子の漏れが少なくなる。炉心 1 0 には正の反応度が印加される。このように、本実施の形態における炉心 1 0 は、冷却材に関する温度係数を負にすることができる。

[0067] 燃料の温度係数は、ドップラー効果等により容易に負になるが、その絶対値は小さい。本実施の形態における冷却材に関する温度係数は、絶対値の大きな負の値にすることができる。本実施の形態の冷却材に関する温度係数は、燃料の温度係数よりも非常に大きな負の値にすることができる。このために、他の構造材等の温度係数が正であっても、炉心全体の温度係数を容易に負にすることができる。

[0068] また、本実施の形態における炉心は、炉心の形状を変化させて冷却材に関する温度係数を小さくしているために、燃料集合体の本数が多い大型の炉心においても、冷却材に関する温度係数を負にすることができる。

[0069] 図 9 を参照して、本実施の形態における間隔調整板 3 1 は、運転サイクルの初期に燃焼部に含まれる領域に配置されている。この構成により、出力や冷却材流量等が変化して冷却材の温度が変化したときに、冷却材の温度変化幅の大きな領域に間隔調整板 3 1 を配置することができて、間隔調整板 3 1 の膨張量を大きくすることができる。間隔調整板 3 1 が膨張したときの燃料集合体 2 1 同士の間隔を大きくすることができて、冷却材に関する温度係数をより負の値にすることができる。

[0070] 例えば、間隔調整板 3 1 を炉心 1 0 の下端の近傍に配置した場合には、運転サイクルの初期において間隔調整板 3 1 が燃焼部の外側に配置される。炉心 1 0 の下端の近傍では、核分裂による熱が冷却材に伝達されていないために、冷却材の温度変化幅が小さくなる。このために、間隔調整板 3 1 を十分に膨張させることができない。本実施の形態のように、間隔調整板 3 1 を燃焼部の領域に配置することにより、冷却材の温度が比較的高い領域に間隔調整板 3 1 を配置することができる。この領域では、冷却材の温度変化幅が大

きくなるために、間隔調整板 3 1 を大きく膨張させることができる。冷却材に関する温度係数をより負の値にすることができる。

[0071] また、間隔調整板 3 1 を燃焼部の領域に配置することにより、冷却材の温度変化幅が大きくなるために、間隔調整板 3 1 の体積が変化する速度が速くなる。冷却材の温度変化に応答性良く追従して、燃料集合体 2 1 同士の間隔を大きくしたり小さくしたりすることができる。すなわち、冷却材の温度変化に対する反応度の応答速度を向上させることができる。

[0072] 更に、本実施の形態における間隔調整板 3 1 は、運転サイクルの初期において冷却材温度が炉心出口の冷却材温度に近い値になる炉心の軸方向の位置に配置されている。冷却材温度は、主に燃焼部の出力密度が高くなる領域において、炉心入口から炉心出口に向けて大きく上昇する。図 9 を参照して、炉心は、炉心入口から炉心出口に向かって冷却材の温度が上昇する高上昇率領域 1 3 1 と、高上昇率領域 1 3 1 よりも温度の上昇率が小さくなる低上昇率領域 1 3 2 とを有する。低上昇率領域 1 3 2 は、高上昇率領域 1 3 1 よりも下流に配置される。図 9 には、運転サイクルの初期の高上昇率領域 1 3 1 および低上昇率領域 1 3 2 が示されている。

[0073] 本実施の形態における間隔調整板 3 1 は、運転サイクルの初期において冷却材の温度上昇が緩やかになる低上昇率領域 1 3 2 に配置されている。この構成を採用することにより、運転サイクルの初期から末期にかけて、間隔調整板 3 1 を低上昇率領域 1 3 2 内に配置することができる。運転サイクルの期間中に燃焼部が移動しても、間隔調整板 3 1 における冷却材温度があまり変化せず、膨張量も変化しない。このため、燃料の燃焼に伴う実効中性子増倍率の変化を抑制することができて、理想的な C A N D L E 燃焼を実現できる。また、燃料の燃焼に伴う冷却材に関する温度係数の変化を小さくすることができる。

[0074] 更に、間隔調整板 3 1 は、冷却材温度が炉心出口の冷却材温度に近い値になる範囲のうち、燃料集合体 2 1 同士の間隔が不変の集合体下端支持部材 3 2 に近い位置に配置することが好ましい。本実施の形態においては、炉心入

口に近い位置に配置することが好ましい。たとえば、間隔調整板 3 1 は、運転サイクルの初期において低上昇率領域 1 3 2 の炉心入口側の端部に配置されることが好ましい。この構成により、間隔調整板 3 1 が膨張したときに燃料集合体同士の間隔を大きくすることができ、冷却材に関する温度係数をより負の値にすることができる。なお、間隔調整板 3 1 の位置は、この形態に限られず、たとえば、炉心出口に配置されていても構わない。

[0075] また、炉心の出力が上昇すると炉心内を流れる冷却材温度が上昇し、炉心の出力が低下すると炉心内を流れる冷却材温度は低下する。冷却材は、炉心入口から炉心出口に向けて炉心内の流路を進行する。冷却材は、流路を進行するときに燃料体から熱を伝達される。このために、炉心の出力が変化したときには、炉心の入口における冷却材温度の変化量は小さく、炉心の出口に向かうにつれて冷却材温度の変化量は大きくなる。たとえば、炉心の出力が上昇するときには、冷却材温度の変化幅は、炉心の入口で最も小さく炉心の出口において最も大きくなる。このため、図 9 を参照して、別の観点からは、炉心 1 0 において、出力が変化したときに冷却材温度の変化幅が小さくなる低変化領域 1 3 3 と、低変化領域よりも冷却材温度の変化幅が大きくなる高変化領域 1 3 4 とを定めることができる。

[0076] 本実施の形態における低変化領域 1 3 3 は、高変化領域 1 3 4 よりも上流側に配置されている領域になる。間隔調整部材を高変化領域 1 3 4 に配置することにより、炉心の出力が変化したときの間隔調整部材の変形量を大きくすることができる。また、燃料体の下端の位置が固定されている場合には、間隔調整部材を低変化領域 1 3 3 に配置することにより、燃料体の上端の移動量を大きくすることができる。すなわち、間隔調整部材の変形量が小さくても、燃料体の下端と間隔調整部材との距離が小さいために、燃料体同士の間隔の変化量を大きくすることができる。

[0077] 本実施の形態における炉心は、燃料集合体の下端が集合体下端支持部材により固定されているが、この形態に限られず、燃料集合体体の下端は、燃料集合体の上端と同様に、径方向に移動可能に支持されていても構わない。た

例えば、集合体下端支持部材は、冷却材の温度に応じて熱膨張するように形成されていても構わない。燃料集合体の下端に配置される集合体下端支持部材は、間隔調整部材と同様の材質で形成されていても構わない。

[0078] 本実施の形態において、間隔調整部材により間隔が調整される燃料体は燃料集合体を含むが、この形態に限られず、燃料体として燃料棒が採用されていても構わない。燃料棒を束にした燃料集合体が構成されておらずに、冷却材の流路が確保されるように燃料棒が直接的に間隔調整部材に支持されていても構わない。また、本実施の形態における間隔調整部材は、炉心に含まれる複数の燃料体のうち、全ての燃料体を支持するように形成されているが、この形態に限られず、一部の燃料体を支持するように形成されていても構わない。

[0079] 本実施の形態における間隔調整部材は、板状に形成されている間隔調整板を含むが、この形態に限られず、間隔調整部材は、互いに隣り合う燃料体同士の距離を温度に応じて調整するように形成されていれば構わない。たとえば、間隔調整部材は、線状に形成されたワイヤ等の部材を含んでいても構わない。または、間隔調整部材は、燃料集合体に取り付けられた熱膨張する塊状の部材であっても構わない。たとえば、間隔調整部材は、支持格子の外面上に取り付けられた直方体状の部材を含み、燃料集合体が炉心に装荷されたときに、隣り合う燃料集合体の直方体状の部材同士が接触するように形成することができる。

[0080] また、本実施の形態においては、炉心の軸方向の1箇所位置に間隔調整板が配置されているが、この形態に限られず、複数の位置に間隔調整部材が配置されていても構わない。

[0081] 本実施の形態においては、炉心10に要求される出力の変化に応じて炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる制御を行うことにより、炉心10の出力を調整する。本実施の形態における原子炉1は、炉心10内を流れる冷却材の温度が変化したときに、絶対値の大きな反応度を印加することができる。本実施の形態における原子炉1は、炉心10に流入する冷却材の温度を変

化させる冷却材温度調整制御を行うことにより、炉心の出力を調整する。本実施の形態の炉心10は、冷却材に関する温度係数が絶対値の大きな負の値を有している。このために、炉心10に流入する冷却材の温度を上昇させることにより、絶対値の大きな負の反応度を炉心10に印加することができ、炉心10の出力を低下させることができる。または、炉心10に流入する冷却材の温度を低下させることにより、大きな正の反応度を炉心10に印加することができ、炉心10の出力を上昇させることができる。特に、本実施の形態においては、炉心の出力を数%程度変更する微調整のみではなく、たとえば、炉心の出力を数10%変更する粗調整を行うことができる。

[0082] 本実施の形態においては、炉心10に流入する冷却材の温度を変化させるために、原子炉に接続されている装置の負荷を変化させる制御を行う。図1を参照して、本実施の形態における発電設備では、発電電力を変更する制御を行う。

[0083] 例えば、炉心10に流入する冷却材の温度を上昇させる場合には、負荷を小さくするために発電電力を減少させる。流量調整弁44の開度を小さくすることにより、タービン4に供給する蒸気流量が少なくなり、発電電力は小さくなる。蒸気発生器3における熱交換の熱量が小さくなる。中間熱交換器2と蒸気発生器3とを循環する2次系のナトリウム52の温度が上昇する。2次系のナトリウム52の温度が上昇することにより、中間熱交換器2から流出する1次系のナトリウム51（冷却材）の温度も上昇する。炉心10に流入する冷却材の温度が上昇し、炉心10の内部を流れる冷却材の温度が上昇する。または、炉心入口よりも炉心出口の方が冷却材の温度が高くなるが、炉心内の平均的な冷却材の温度が上昇する。平均的な冷却材の温度としては、炉心軸の方向に平均した冷却材の温度を例示することができる。炉心10は、冷却材に関する温度係数が負の値であるために、冷却材の温度が上昇すると、炉心10には負の反応度が印加される。この結果、炉心10の出力を低下させることができる。

[0084] また、炉心10に流入する冷却材の温度を低下させる場合には、負荷を大

きくするために、発電電力を増大させる。流量調整弁44の開度を大きくすることにより、タービン4に供給する蒸気流量が多くなり、発電電力が大きくなる。蒸気発生器3にて熱交換を行う熱量が多くなる。このため、2次系のナトリウム52および1次系のナトリウム51（冷却材）の温度が低下する。炉心10に流入する冷却材の温度が低下して、炉心10には正の反応度が印加される。この結果、炉心10の出力を上昇させることができる。

[0085] このように、本実施の形態においては、原子炉1に接続される装置が消費する熱量を小さくすることにより、炉心10に流入する冷却材の温度を上昇させることができ、炉心10の出力を低下させることができる。また、原子炉1に接続される装置が消費する熱量を大きくすることにより、炉心10に流入する冷却材の温度を低下させることができ、炉心10の出力を上昇させることができる。

[0086] このように、本実施の形態における原子炉は、制御棒を用いなくても炉心の出力を変更することができる。なお、原子炉としては、この形態に限られず、制御棒による反応度調整を併用しても構わない。

[0087] 本実施の形態においては、タービンに供給する蒸気流量を調整することにより、炉心に流入する冷却材の温度を変化させているが、この形態に限られず、原子炉に供給する冷却材の温度を調整することができる任意の装置を採用することができる。例えば、図1を参照して、1次系のナトリウム51の循環流路、2次系のナトリウム52の循環流路および水および水蒸気の循環流路のうち、少なくとも1つの流路に熱交換器等を配置して熱媒体の温度を調整しても構わない。

[0088] 図12に、本実施の形態における冷却材温度調整制御のタイムチャートを示す。図12には、炉心の出力を低下させる制御を例示している。本実施の形態における原子炉は、通常の運転制御では、炉心の出力がほぼ一定になるように運転されている。

[0089] 図12には、実線にて炉心入口の冷却材温度をステップ状に上昇した場合を記載している。時刻t1までは、定常的な運転を行なっている。また、炉

心に流入する冷却材の流量は、炉心の出力の変更期間中にも、ほぼ一定に保たれている。

[0090] 時刻 t_1 において、発電電力を減少させる制御を行っている。炉心入口の冷却材温度はステップ状に上昇している。燃料温度および炉心出口の冷却材温度は、炉心入口の冷却材温度の上昇に伴って上昇する。燃料の温度は、冷却材の温度上昇に伴って炉心入口から炉心出口に向かって徐々に上昇するが、図 12 に示す燃料温度は、炉心 10 内の平均的な温度を示している。燃料の平均的な温度としては、冷却材の平均的な温度と同様に、炉心軸の方向に燃料温度を平均した値を例示することができる。

[0091] 炉心入口の冷却材温度が上昇するために、炉心内の冷却材の平均的な温度も上昇する。本実施の形態における炉心では、冷却材に関する温度係数が絶対値の大きな負の値を有するために、炉心には負の反応度が印加される。このため、臨界が維持されている状態から未臨界の状態になり、炉心の出力は低下する。

[0092] 炉心の出力の低下に伴って、一時的に上昇した燃料の温度が低下し、所定の温度でほぼ一定になる。また、炉心の出力の低下に伴って、一時的に上昇した炉心出口の冷却材温度も低下し、所定の温度でほぼ一定になる。炉心に印加される反応度は、一時的に低下するが、冷却材出口の温度の低下および燃料温度の低下に伴って、ほぼ零に戻る。すなわち、炉心は、未臨界状態から臨界状態に戻る。炉心の出力が低下した状態で、再び臨界状態に移行する。このように、炉心入口の冷却材温度を上昇することにより、炉心の出力を低下させることができる。

[0093] 図 12 には、破線にて炉心入口の冷却材温度を徐々に上昇した場合を記載している。炉心入口の冷却材温度を徐々に上昇させるためには、例えば、発電電力を徐々に低下させることができる。炉心入口の冷却材温度を徐々に上昇した場合には、炉心の出力を徐々に低下させることができる。炉心に印加される反応度は、ほぼ一定の零の状態が継続する。すなわち、炉心がほぼ臨界の状態を維持しながら炉心の出力を変更することができる。燃料温度およ

び炉心出口の冷却材温度も、急激に変更せずに徐々に変化する。

- [0094] この様に、炉心に流入する冷却材温度を変化させる冷却材温度調整制御としては、炉心に流入する冷却材温度をステップ状に変化させたり、徐々に変化させたりすることができる。炉心の出力を上昇させる場合には、上記の制御の例とは反対に、炉心入口の冷却材温度をステップ状に低下させたり、徐々に低下させたりすることができる。
- [0095] 本実施の形態の反応度印加機構は、冷却材の温度変化により間隔調整部材が膨張したり収縮したりすることにより、冷却材に関する温度係数が絶対値の大きな負の値になるように形成されている。反応度印加機構としては、この形態に限られず、炉心の出力が変更可能な反応度が印加される任意の機構を採用することができる。たとえば、反応度印加機構は、冷却材に関する温度係数を絶対値がより大きな負の値にするために、鉛の同位体のうち ^{208}Pb を主成分とする冷却材を採用することが好ましい。
- [0096] 鉛は、高速中性子の散乱断面積が大きいことや捕獲断面積が小さいために高速炉の冷却材としては好適である。鉛は、鉛204、鉛206、鉛207、および鉛208の4つの同位体を有する。鉛208は、これらの同位体の中でも中性子の捕獲断面積が他の鉛の同位体よりも小さいために冷却材としては好適である。更に、鉛208は、他の鉛の同位体よりも冷却材に関する温度係数をより負側の値にすることができる。
- [0097] 図13に、鉛の同位体の非弾性散乱断面積のグラフを示す。横軸および縦軸は、対数目盛りで示されている。それぞれの鉛の同位体の非弾性散乱断面積は、所定の閾値を有する。例えば、鉛204および鉛206は、中性子エネルギーが 10^6eV 程度のところで閾値を有する。この閾値よりも大きければ中性子は非弾性散乱されて減速される。
- [0098] 高速炉の中性子スペクトルは、 10^6eV よりも少し低い中性子エネルギーにおいてピークを有する。たとえば、冷却材として鉛204および鉛206を用いた場合には、多くの中性子が冷却材により非弾性散乱されて減速される。このために、冷却材温度が上昇して冷却材の密度が減少した場合には、中

性子の非弾性散乱の減速の効果が非常に小さくなる。中性子スペクトルが硬化して反応度が正側に变化する。

[0099] これに対して、冷却材として鉛²⁰⁸を用いた場合には、非弾性散乱断面積の中性子エネルギーの閾値が大きいために、中性子を非弾性散乱させる効果が鉛²⁰⁴等よりも小さい。このために、冷却材の温度が上昇して冷却材の密度が減少しても、中性子スペクトルが硬化する作用を鉛²⁰⁴等よりも小さくすることができる。反応度が正側に移行する作用を鉛²⁰⁴等よりも小さくすることができる。このため、冷却材として鉛²⁰⁸を用いた場合には、他の鉛²⁰⁴等を冷却材として用いた場合に比べて、冷却材に関する温度係数をより負側の値にすることができる。

[0100] このため、冷却材としては、鉛を同位体分離等することにより鉛²⁰⁸の含有率を高めた鉛²⁰⁸を主成分とする冷却材を採用することが好ましい。更に、冷却材に含まれる鉛のほぼ全てが鉛²⁰⁸であることが好ましい。この構成により、冷却材に関する温度係数を絶対値のより大きな負の値にすることができる。また、炉心の出力を容易に変更することができる。

[0101] 本実施の形態における燃料は、炉心に装荷する新燃料として劣化ウランを例に取り上げて説明したが、この形態に限られず、天然ウランおよび劣化ウランのうち少なくとも一方を用いて、CANDLE燃焼を達成することができる。または、CANDLE燃焼を行なうことができる任意の高速中性子炉に、本発明を適用することができる。

[0102] 本実施の形態においては、運転サイクルの初期において前サイクルの燃焼部を新燃料部の上側に配置したが、この形態に限られず、新燃料部は、炉心の軸方向のうち、燃焼部のいずれか一方の端部に配置することができる。さらには、燃焼部の両側に新燃料部が配置されていても構わない。

[0103] また、本実施の形態においては、運転サイクルの初期の燃焼を開始する部分は、前サイクルの運転サイクルの末期において、炉心の下部に配置されている燃料を使用しているが、この形態に限られず、運転サイクルの初期における燃焼を開始する部分は、中性子を自発的に発生するように形成されてい

れば構わない。たとえば、所定の濃度のプルトニウムや濃縮ウランなどを含む燃料が配置されていても構わない。更には、外部から中性子が供給されることにより、燃焼が開始されても構わない。

[0104] また、本実施の形態における炉心は、炉心の軸方向が鉛直方向と平行になっているが、この形態に限られず、炉心の軸方向は水平方向と平行になっても構わない。すなわち、本実施の形態における炉心を横置きにしても構わない。

[0105] 本実施の形態においては、発電設備に用いられる原子炉の炉心を例に取り上げて説明したが、この形態に限られず、任意の設備の原子炉に本発明を適用することができる。たとえば、船舶等の動力源として本発明の原子炉を用いることができる。

[0106] (実施の形態2)

図14を参照して、実施の形態2における原子炉および発電設備について説明する。本実施の形態における原子炉および発電設備の構造は、実施の形態1と同様である。本実施の形態においては、炉心に流入する冷却材の流量を変化させる冷却材流量調整制御を行うことにより、炉心に印加される反応度を変化させて、炉心の出力を変更する。本実施の形態においても実施の形態1と同様に、炉心に要求される出力の変化に応じて炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる制御を行う。本実施の形態においては、炉心に流入する冷却材の流量を変化させることにより、炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる。

[0107] 図1を参照して、炉心10に流入する冷却材の温度が一定のときに、炉心10に流入する冷却材の流量を変化させることにより、炉心出口の冷却材の温度を変化させることができる。この場合に、炉心10内の冷却材の平均的な温度が変化する。たとえば、炉心入口から炉心出口まで炉心の軸方向に冷却材の温度を平均した値が変化する。この結果、炉心10に対して正または負の反応度を印加することができる。

[0108] たとえば、炉心10に流入する冷却材の流量を減少させることにより、炉

心10内の冷却材温度を上昇させることができる。本実施の形態における原子炉の炉心は、絶対値の大きな負の冷却材に関する温度係数を有するために、炉心10内の冷却材温度を上昇させることにより、炉心10に対して負の反応度を印加することができる。この結果、炉心10の出力を低下させることができる。また、炉心10に流入する冷却材の流量を増加することにより、炉心10に対して正の反応度を印加することができて、炉心10の出力を上昇させることができる。

[0109] 本実施の形態においては、炉心10に冷却材を供給するポンプ41の出力を変更することにより、炉心10に流入する冷却材の流量を変更している。また、本実施の形態においては、炉心10に流入する冷却材の流量を変更しても、炉心10に流入する冷却材の温度がほぼ一定になるように、原子炉に接続されている負荷を調整している。すなわち、発電電力を調整している。

[0110] 図14に、本実施の形態における冷却材流量調整制御のタイムチャートを示す。図14には、炉心の出力を低下させる制御を例示している。図14では、実線にて炉心に流入する冷却材の流量をステップ状に変更した場合を記載している。時刻t1までは、定常的な運転を行なっている。

[0111] 時刻t1において、炉心10に流入する冷却材の流量をステップ状に減少させている。炉心出口の冷却材温度は、炉心10の内部を流れる冷却材の流量が減少するために、一時的に上昇する。炉心内の冷却材の平均的な温度も上昇する。燃料温度は、冷却材の平均的な温度の上昇に伴って、一時的に上昇する。図14に示す燃料温度は、炉心内の平均的な温度を示している。

[0112] 本実施の形態における炉心10は、冷却材に関する温度係数が絶対値の大きな負の値であるために、炉心10には負の反応度が印加されて、炉心10の出力が低下する。炉心10の出力の低下に伴って、炉心出口の冷却材温度および燃料温度が低下して、ほぼ一定の温度になる。反応度は、炉心内の冷却材温度の低下および燃料温度の低下に伴って正側に移行し、ほぼ零に戻る。すなわち、炉心は一時的に未臨界状態になり、その後臨界状態に戻る。炉心の出力は、時刻t1から低下して、所定の出力でほぼ一定になる。

- [0113] このように、本実施の形態における原子炉の炉心は、炉心に供給する冷却材の流量を減少させることにより、炉心の出力を低下させることができる。
- [0114] 図14には、破線にて冷却材の流量を徐々に変更した場合を示している。冷却材の流量を徐々に変更した場合には、炉心の反応度は、ほぼ零の値に保たれる。炉心がほぼ臨界状態を維持しながら、炉心の出力を低下させることができる。冷却材流量を徐々に変化させると共に、炉心出口の冷却材温度および燃料温度も徐々に変化する。このように、炉心に流入する冷却材の流量を徐々に変化させても、炉心の出力を変更することができる。
- [0115] 炉心の出力を上昇させる場合には、上記の制御の例とは反対に、炉心に流入する冷却材の流量をステップ状に増加させたり、徐々に増加させたりすることができる。
- [0116] 本実施の形態においては、炉心に冷却材を供給するポンプの出力を変更することにより、炉心に流入する冷却材の流量を変化させているが、この形態に限られず、任意の機構により炉心に流入する冷却材の流量を変化させることができる。例えば、原子炉容器の内部に冷却材の流量を調整する装置を配置したり、燃料集合体の端部に冷却材の流量を調整する装置を配置したりしても構わない。
- [0117] その他の構成、作用および効果等については、実施の形態1と同様であるので、ここでは説明を繰り返さない。
- [0118] 上記の実施の形態1の冷却材温度調整制御および実施の形態2の冷却材流量調整制御は、組み合わせて行うことができる。たとえば、冷却材流量調整制御を主制御として炉心の出力の変更を行っている期間中に、補助制御として冷却材流量調整制御を行うことができる。
- [0119] 上述のそれぞれの図において、同一または相当する部分には同一の符号を付している。なお、上記の実施の形態は例示であり発明を限定するものではない。また、実施の形態においては、請求の範囲に示される変更が含まれている。

符号の説明

- [0120]
- 1 原子炉
 - 2 中間熱交換器
 - 3 蒸気発生器
 - 4 タービン
 - 5 発電機
 - 6 復水器
 - 10 炉心
 - 11 新燃料部
 - 12 燃焼部
 - 13 燃焼が進んだ部分
 - 21 燃料集合体
 - 22 燃料棒
 - 25 a, 25 b 支持格子
 - 31 間隔調整板
 - 32 集合体下端支持部材
 - 33 集合体上端支持部材
 - 41～43 ポンプ
 - 44 流量調整弁
 - 51, 52 ナトリウム

請求の範囲

[請求項1] 新燃料が装荷されている新燃料部と、新燃料部の一方の側に配置され、中性子を発生して燃料が燃焼する燃焼部とを備え、新燃料は天然ウランおよび劣化ウランのうち少なくとも一方のウランを含み、ウランが中性子を吸収して生成されたプルトニウムが核分裂することにより出力を発生し、運転サイクルの初期から末期にかけて、燃焼部がほぼ一定の形状を保ちながら新燃料部に向かう方向に移動する炉心を備える原子炉であって、

炉心内を流れる冷却材の温度が変化したときに、炉心の出力を変更可能な反応度が印加される反応度印加機構を備えており、

炉心に要求される出力の変化に応じて炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる制御を行うことにより、炉心の出力が調整されることを特徴とする、原子炉。

[請求項2] 反応度印加機構は、燃料棒または燃料集合体を含む燃料体と、
運転サイクルの初期に燃焼部に含まれる領域に配置され、複数の燃料体同士を互いに支持し、燃料体同士の間隔を定める間隔調整部材とを含み、

間隔調整部材は、温度が上昇すると膨張する材質で形成されており、

炉心内の冷却材の温度が上昇したときに間隔調整部材が膨張し、燃料体同士の間隔が大きくなる、請求項1に記載の原子炉。

[請求項3] 炉心は、炉心入口から炉心出口に向かって冷却材の温度が上昇する高上昇率領域と、高上昇率領域よりも下流に配置され、高上昇率領域よりも温度の上昇率が小さくなる低上昇率領域とを有し、

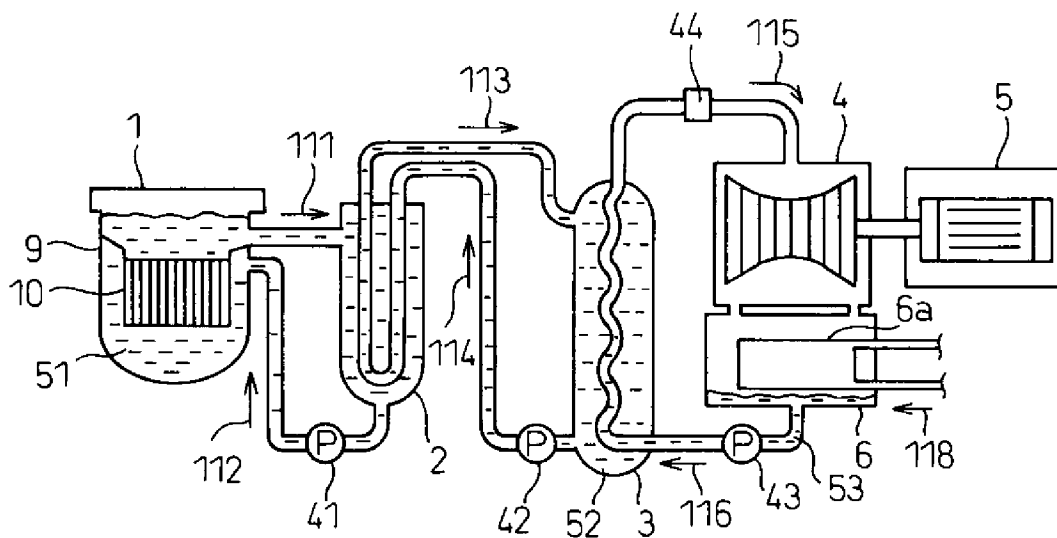
間隔調整部材は、運転サイクルの初期において低上昇率領域に配置されている、請求項2に記載の原子炉。

[請求項4] 間隔調整部材は、穴部を有する間隔調整板を含み、
複数の燃料体は、穴部に支持されている、請求項2に記載の原子炉

- 。
- [請求項5] 炉心に流入する冷却材の温度を変化させる冷却材温度調整制御を行うことにより、炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる、請求項1に記載の原子炉。
- [請求項6] 炉心に流入する冷却材の流量が変化したときに、炉心内を流れる冷却材の温度が変化し、炉心の出力を変更可能な反応度が印加されるように形成されており、
- 炉心に流入する冷却材の流量を変化させる冷却材流量調整制御を行うことにより、炉心内を流れる冷却材の温度を変化させる、請求項1に記載の原子炉。
- [請求項7] 冷却材は、鉛の同位体のうち鉛208が主成分である、請求項1に記載の原子炉。
- [請求項8] 請求項1に記載の原子炉と、
- 炉心により生じる熱により水蒸気を生成する蒸気発生器と、
- 蒸気発生器にて生成された水蒸気が供給されて回転するタービンと、
- タービンに接続されている発電機とを備える、発電設備。

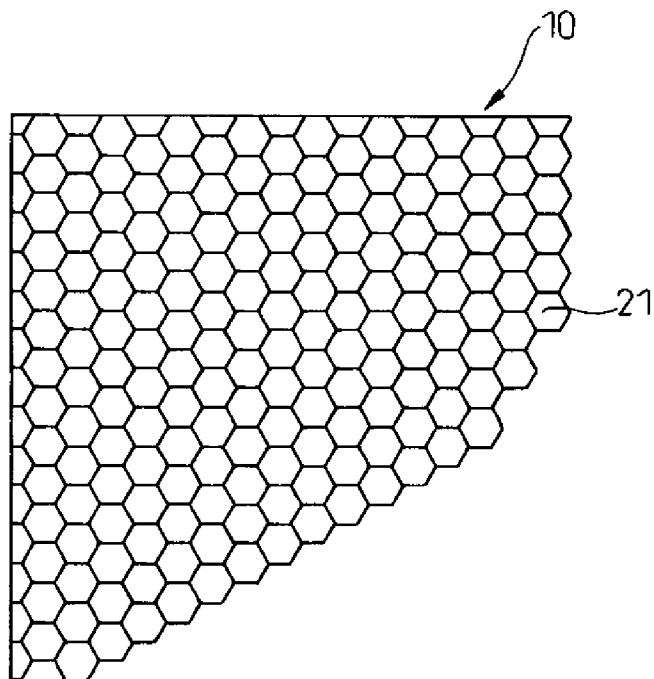
[図1]

図1

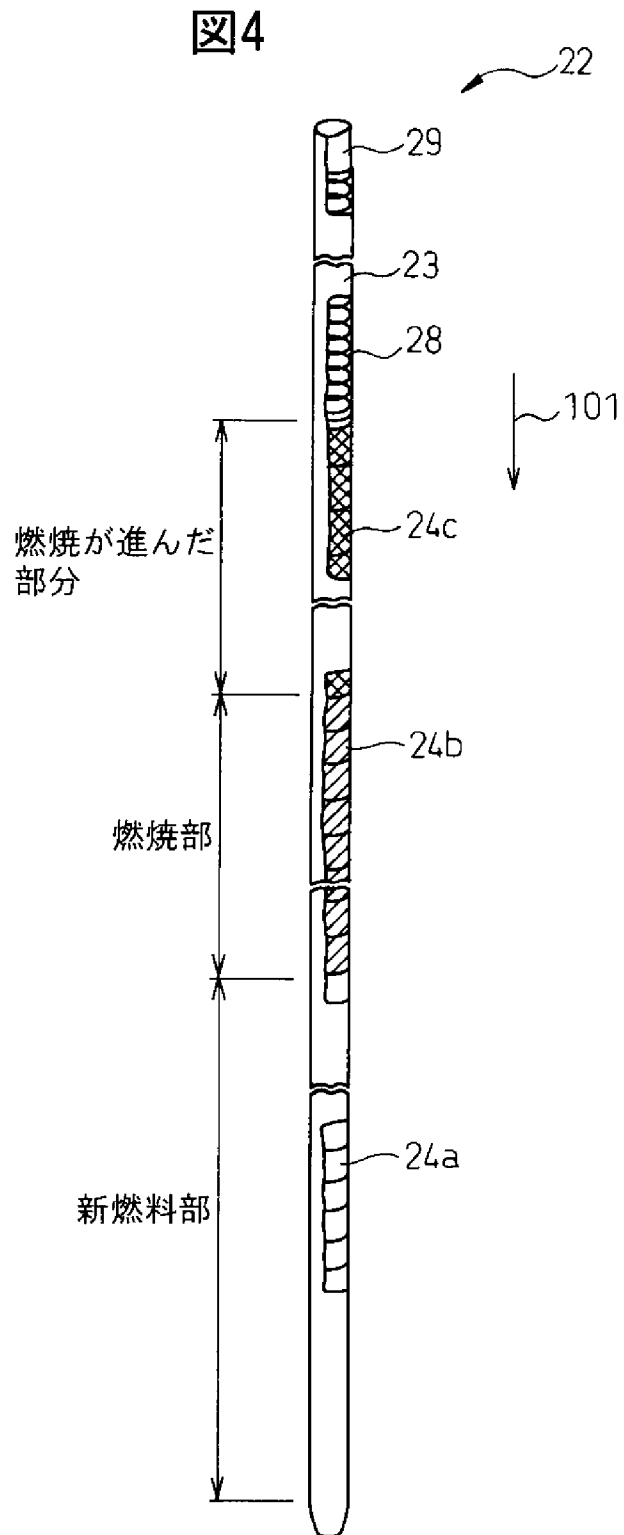


[図2]

図2

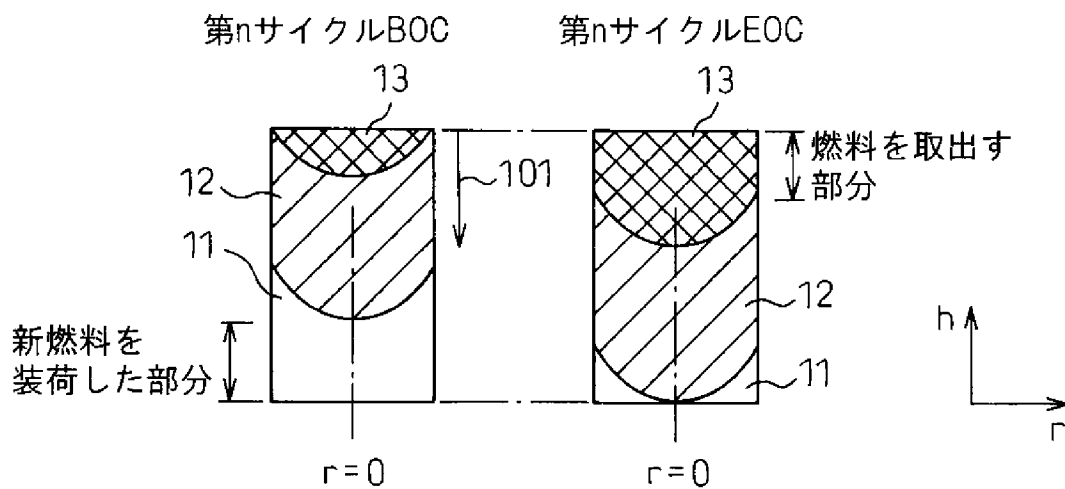


[図4]



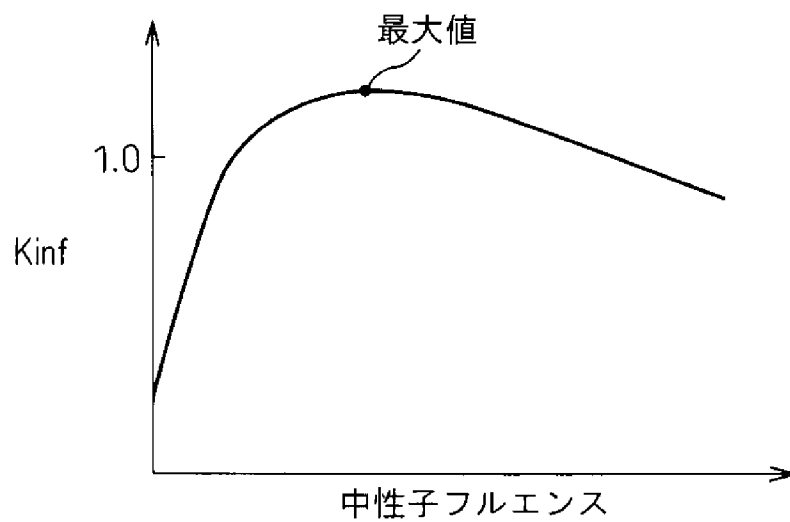
[図5]

図5

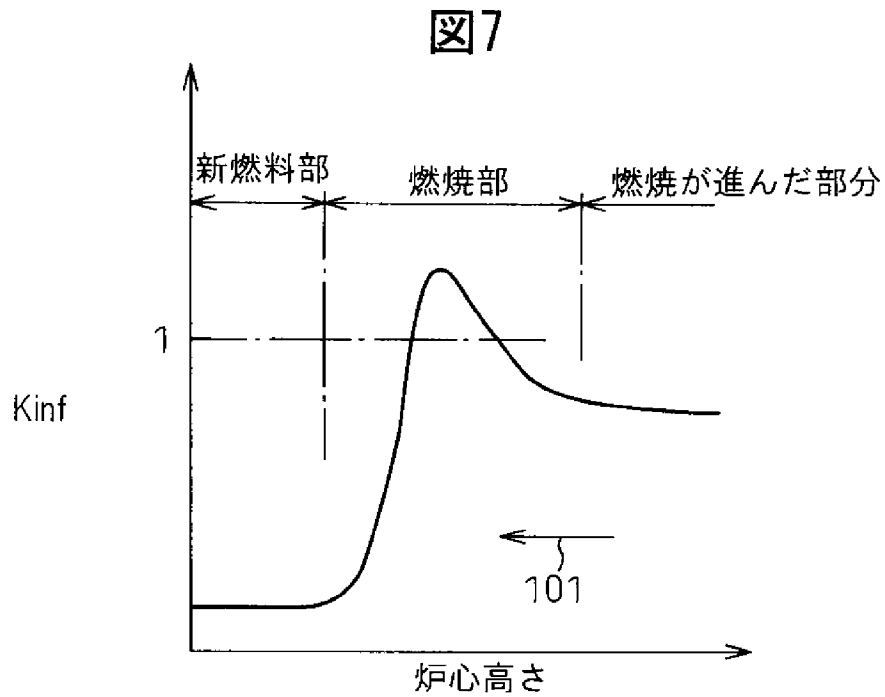


[図6]

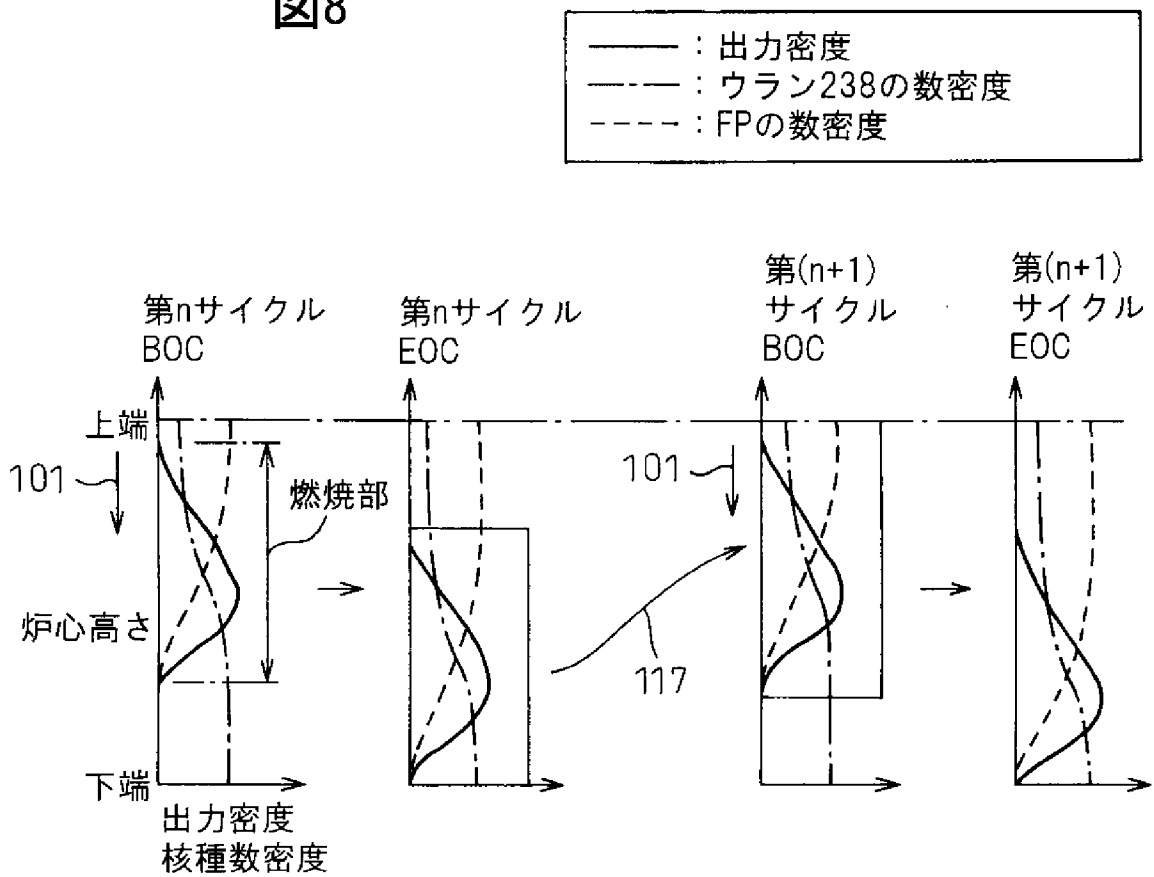
図6



[図7]

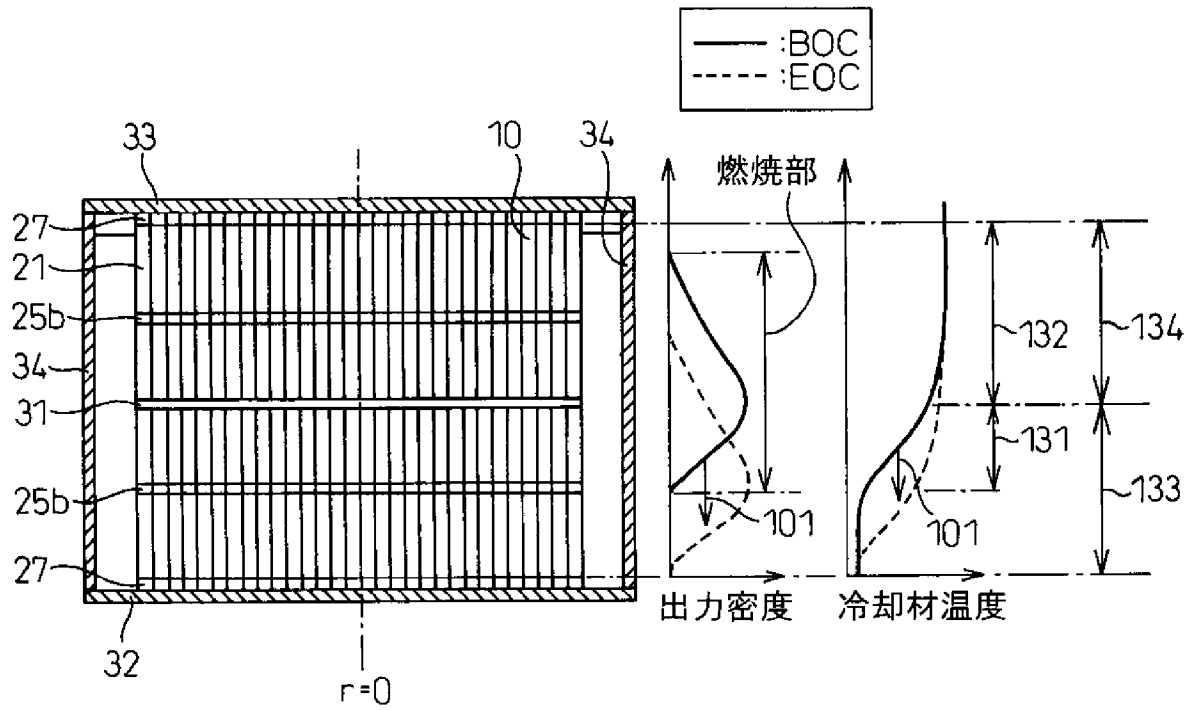


[図8]

図8

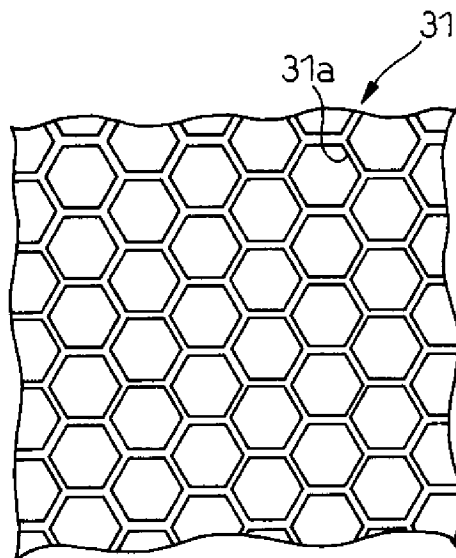
[図9]

図9



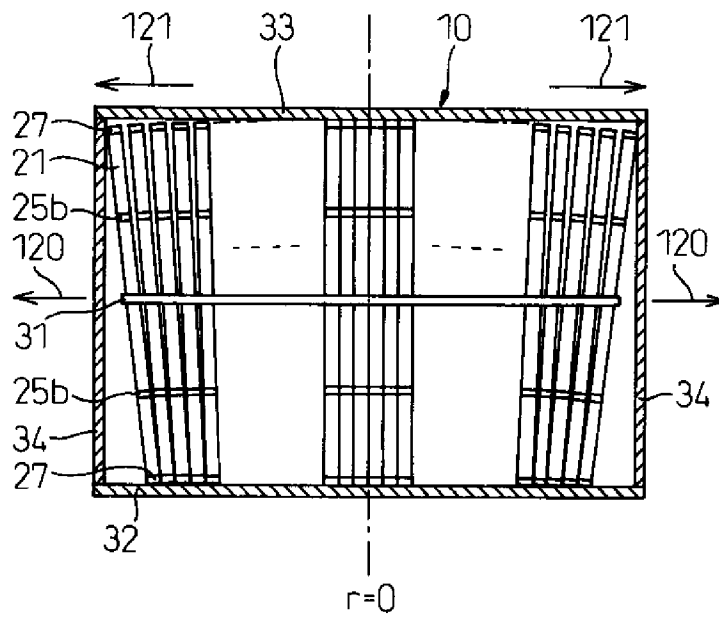
[図10]

図10



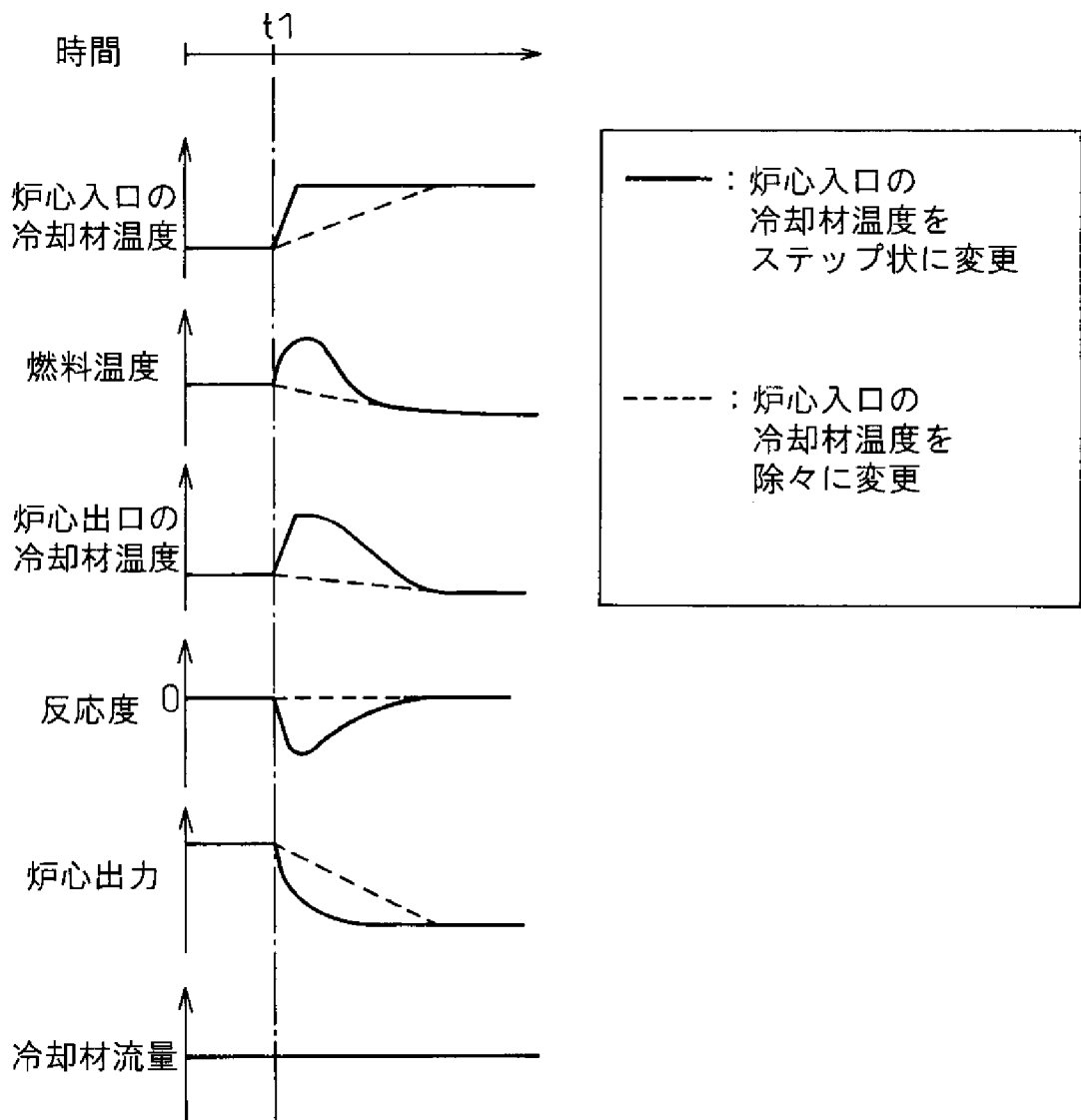
[図11]

図11



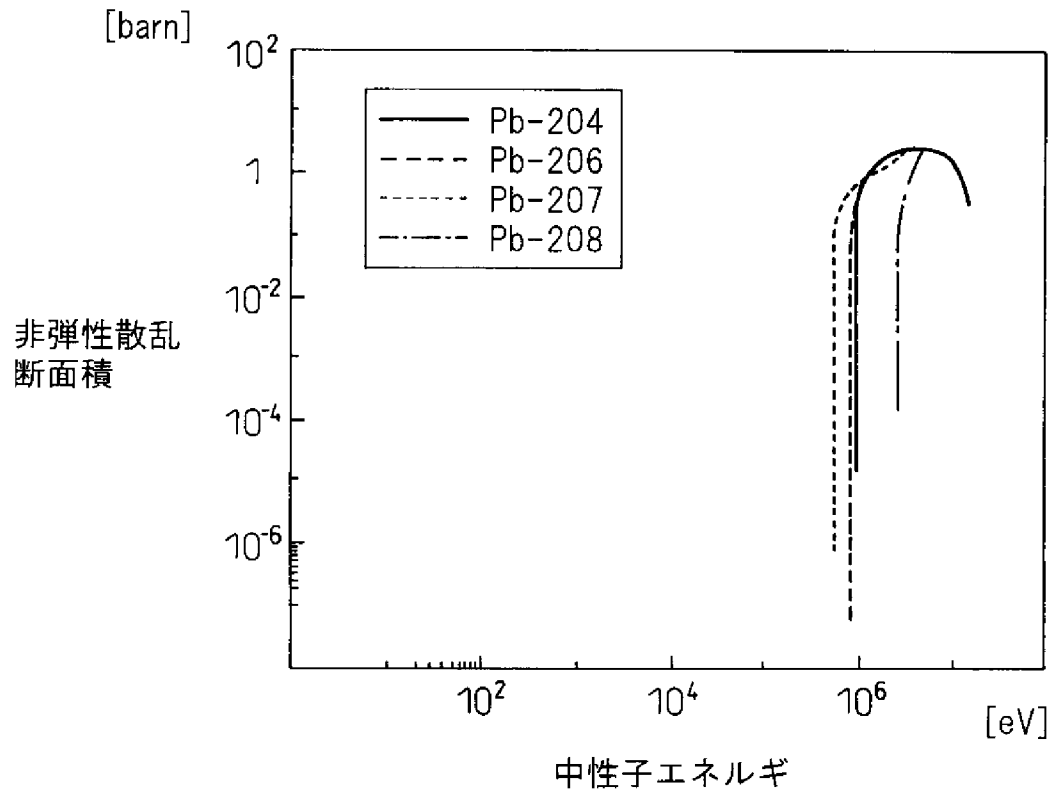
[図12]

図12



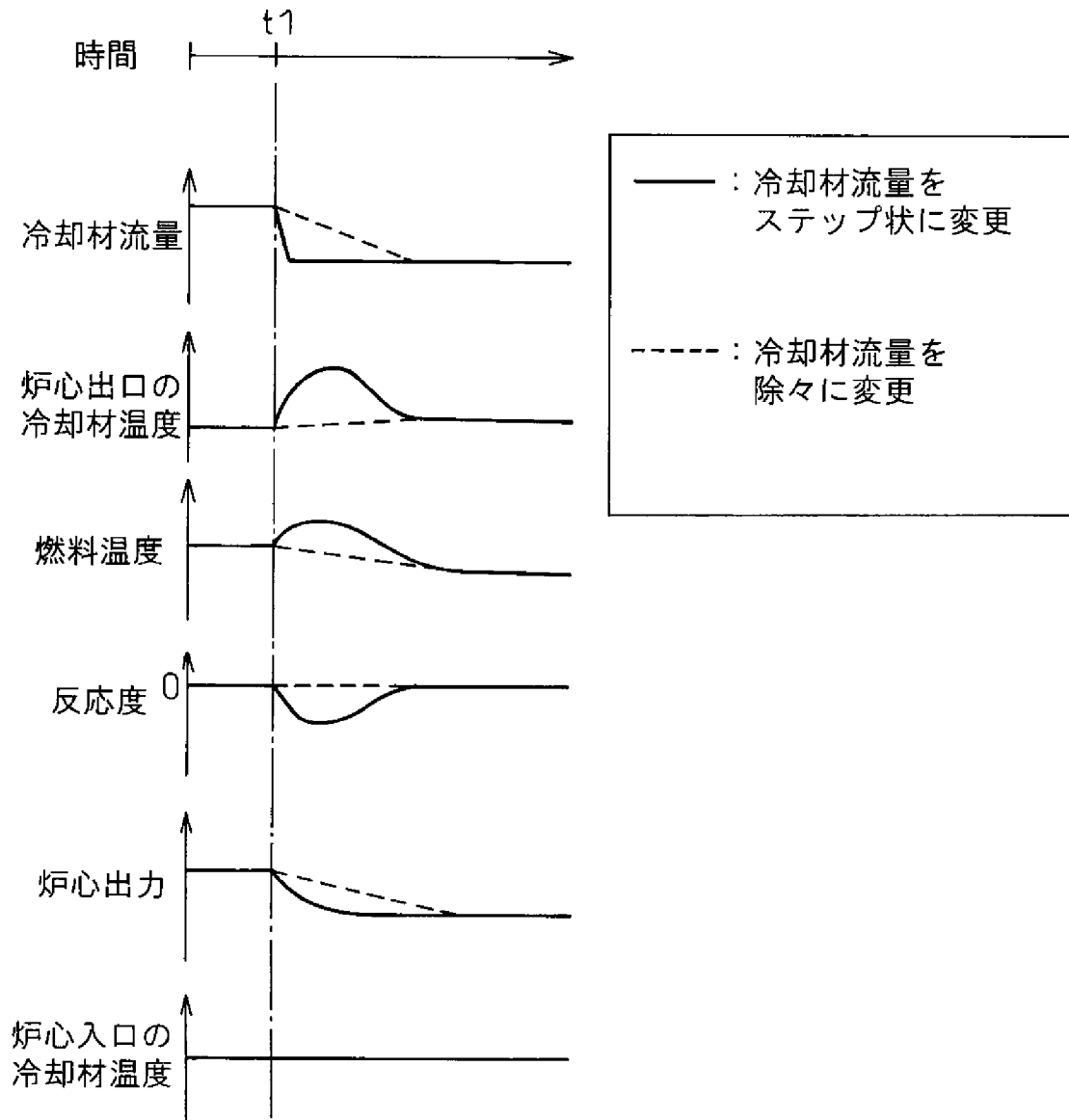
[図13]

図13



[図14]

図14



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/050972

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G21C7/30(2006.01) i, G21C3/328(2006.01) i, G21C5/00(2006.01) i, G21C5/18(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G21C7/30, G21C3/328, G21C5/00, G21C5/18

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2002-71866 A (President of Tokyo Institute of Technology), 12 March 2002 (12.03.2002), entire text; all drawings (Family: none)	1-8
A	JP 2007-232429 A (Tokyo Institute of Technology), 13 September 2007 (13.09.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1-8
A	JP 7-43488 A (Hitachi, Ltd.), 14 February 1995 (14.02.1995), entire text; all drawings (Family: none)	1-8

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
07 March, 2012 (07.03.12)

Date of mailing of the international search report
19 March, 2012 (19.03.12)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/050972

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 1-101497 A (Nippon Atomic Industry Group Co., Ltd.), 19 April 1989 (19.04.1989), entire text; all drawings (Family: none)	1-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G21C7/30(2006.01)i, G21C3/328(2006.01)i, G21C5/00(2006.01)i, G21C5/18(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G21C7/30, G21C3/328, G21C5/00, G21C5/18

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2012年
日本国実用新案登録公報	1996-2012年
日本国登録実用新案公報	1994-2012年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2002-71866 A (東京工業大学長) 2002.03.12, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8
A	JP 2007-232429 A (国立大学法人東京工業大学) 2007.09.13, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8
A	JP 7-43488 A (株式会社日立製作所) 1995.02.14, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

07.03.2012

国際調査報告の発送日

19.03.2012

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

青木 洋平

電話番号 03-3581-1101 内線 3273

21

3104

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 1-101497 A (日本原子力事業株式会社) 1989.04.19, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-8