

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7569849号  
(P7569849)

(45)発行日 令和6年10月18日(2024.10.18)

(24)登録日 令和6年10月9日(2024.10.9)

(51)国際特許分類 F I  
G 2 1 C 5/18 (2006.01) G 2 1 C 5/18  
G 2 1 C 5/00 (2006.01) G 2 1 C 5/00 A

請求項の数 27 (全28頁)

(21)出願番号	特願2022-520139(P2022-520139)	(73)特許権者	521440998
(86)(22)出願日	令和2年9月28日(2020.9.28)		ビーダブリューエックスティ・アドバンス
(65)公表番号	特表2022-550199(P2022-550199)		スト・テクノロジーズ・リミテッド・ラ
	A)		イアピリティ・カンパニー
(43)公表日	令和4年11月30日(2022.11.30)		BWXT Advanced Techn
(86)国際出願番号	PCT/US2020/053007		ologies LLC
(87)国際公開番号	WO2021/067157		アメリカ合衆国24501バージニア州
(87)国際公開日	令和3年4月8日(2021.4.8)		リンチバーグ、ラムジー・プレイス10
審査請求日	令和5年8月7日(2023.8.7)		9
(31)優先権主張番号	62/907,753	(74)代理人	100145403
(32)優先日	令和1年9月30日(2019.9.30)		弁理士 山尾 憲人
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)	(74)代理人	100132241
			弁理士 岡部 博史
(31)優先権主張番号	17/032,007	(74)代理人	100113170
(32)優先日	令和2年9月25日(2020.9.25)		弁理士 稲葉 和久
	最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 インボリユート曲線形状のクラディングアームを有するセグメントクラディング本体を備える核分裂炉

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数の層を備える核分裂原子炉構造であって、

前記複数の層のそれぞれの層は、

内側セグメント本体の第1側面から内側セグメント本体の第2側面まで軸方向に延びる内側開口部を含む内側セグメント本体と、

前記内側セグメント本体の半径方向外側にある中間セグメント本体と、

前記中間セグメント本体の半径方向外側にある外側セグメント本体と、

前記内側セグメント本体と前記中間セグメント本体とを分離する第1内部接触面と、

前記中間セグメント本体と前記外側セグメント本体とを分離する第2内部接触面と、

を含み、

前記軸方向に延びる内側開口部に垂直な平面における平面断面図において、

前記内側セグメント本体は、前記内側開口部に隣接する第1半径方向内側端部から前記第1内部接触面の第1半径方向外側端部までらせん状に外側に放射する第1インボリユート曲線形状を有する複数の内側クラディングアームを含み、

前記中間セグメント本体は、前記第1内部接触面に隣接する第2半径方向内側端部から前記第2内部接触面の第2半径方向外側端部までらせん状に外側に放射する第2インボリユート曲線形状を有する複数の中間クラディングアームを含み、

前記外側セグメント本体は、前記第2内部接触面に隣接する第3半径方向内側端部から前記外側セグメント本体の半径方向外側表面の第3半径方向外側端部までらせん状に外

側に放射する第3インボリュート曲線形状を有する複数の外側クラディングアームを含み、

前記内側クラディングアームは、前記内側セグメント本体の前記第1側面から前記内側セグメント本体の第2側面まで延びる対向する側面を有し、

少なくとも1つの突起が少なくとも1つの前記対向する側面から外側に突出し、

前記突起は、前記突起が突出する前記少なくとも1つの側面から遠位の頂面を有し、第1の内側クラディングアームが第2の内側クラディングアームにすぐ隣接する状態で、前記内側セグメント本体に組み立てられる場合、前記第1の内側クラディングアームの前記突起の前記頂面は、前記第2の内側クラディングアームの対向する側面に接触し、前記第1の内側クラディングアームと前記第2の内側クラディングアームとの間にチャンネルを形成する、

10

核分裂原子炉構造。

【請求項2】

第1インボリュート曲線形状と、第2インボリュート曲線形状と、第3インボリュート曲線形状とは、前記内側開口部から前記外側セグメント本体の前記半径方向外側表面まで延びる連続したインボリュート曲線形状を形成する、

請求項1に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項3】

前記連続したインボリュート曲線形状の表面の突起は、前記第1内部接触面と前記第2内部接触面とを横切って延び、前記複数の内側クラディングアームの1つの表面、前記複数の中間クラディングアームの1つの表面、および前記複数の外側クラディングアームの1つの表面のそれぞれと一致する、

20

請求項2に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項4】

前記第1インボリュート曲線形状、前記第2インボリュート曲線形状、および前記第3インボリュート曲線形状のそれぞれは、前記内側開口部から前記外側セグメント本体の半径方向外側表面まで延びる連続したインボリュート曲線形状の異なる部分に対応する、

請求項1に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項5】

前記第1インボリュート曲線形状、前記第2インボリュート曲線形状、および前記第3インボリュート曲線形状のそれぞれは、異なる曲率を有する、

30

請求項1に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項6】

前記複数の内側クラディングアーム、前記複数の中間クラディングアーム、および前記複数の外側クラディングアームのそれぞれは、複数のチャンバを含む、

請求項1から5のいずれかに記載の核分裂原子炉構造。

【請求項7】

それぞれの前記クラディングアームの前記チャンバは、ウェブにより互いに分離している、

請求項6に記載の核分裂原子炉構造。

40

【請求項8】

それぞれの前記内側クラディングアームは、それぞれの前記外側クラディングアームよりも多くのチャンバを有する、

請求項6に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項9】

前記複数のチャンバは、10個以下である、

請求項6に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項10】

それぞれの前記中間クラディングアームは、それぞれの前記外側クラディングアームと同数のチャンバを有する、

50

請求項 6 に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項 1 1】

前記チャンバは、核分裂性の燃料組成および減速材のうち 1 つを含む、  
請求項 6 に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項 1 2】

前記クラディングアームに沿って異なる位置にあるチャンバは、異なる核分裂性の燃料組成を含む、

請求項 1 1 に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項 1 3】

前記クラディングアームに沿って異なる位置にあるチャンバは、異なる減速材を含む、  
請求項 1 2 に記載の核分裂原子炉構造。

10

【請求項 1 4】

前記核分裂性の燃料組成がチャンバ内に位置する場合、前記チャンバの 1 つの内面の少なくとも一部と、前記核分裂性の燃料組成を形成する本体の 1 つの外面の少なくとも一部との間に隙間が存在する、

請求項 1 1 に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項 1 5】

それぞれの突起は、前記少なくとも 1 つの対向する側面に沿って、前記内側セグメント本体の前記第 1 側面に向かう第 1 端部から前記内側セグメント本体の前記第 2 側面に向かう第 2 端部まで連続して延びる、

請求項 1 に記載の核分裂原子炉構造。

20

【請求項 1 6】

それぞれの突起は、前記少なくとも 1 つの対向する側面に沿って、前記内側セグメント本体の前記第 1 側面に向かう第 1 端部から前記内側セグメント本体の前記第 2 側面に向かう第 2 端部まで不連続に延びる、

請求項 1 に記載の核分裂原子炉構造。

【請求項 1 7】

前記内側セグメント本体、前記中間セグメント本体、前記外側セグメント本体、前記第 1 内部接触面、および前記第 2 内部接触面は、層を画定する、

請求項 1 に記載の核分裂原子炉構造。

30

【請求項 1 8】

第 1 端面、第 2 端面、および前記第 1 端面と前記第 2 端面とを接続する外側側面を有する核分裂原子炉構造に組み立てられた、請求項 1 7 に記載の複数の層と、

前記核分裂原子炉構造の前記外側側面の周りに配置された半径方向反射体と、  
格納容器と、

前記格納容器の開口部を介して前記核分裂原子炉構造に流体連通する冷却材システムと、  
を備える、

核分裂原子炉。

【請求項 1 9】

前記核分裂原子炉構造は、円筒構造を有する、

請求項 1 8 に記載の核分裂原子炉。

40

【請求項 2 0】

前記冷却材システムは、液体ベースまたは気体ベースである、

請求項 1 8 に記載の核分裂原子炉。

【請求項 2 1】

前記複数の層のそれぞれにおける前記第 1 内部接触面と前記第 2 内部接触面とは、前記第 1 端面から前記第 2 端面まで活性炉心構造を横断する複数の二次冷却材チャンネルを含む、  
請求項 1 8 に記載の核分裂原子炉。

【請求項 2 2】

請求項 1 に記載の前記核分裂原子炉構造を製造する方法であって、

50

前記内側セグメント本体と、前記中間セグメント本体のセグメントと、前記外側セグメント本体のセグメントと、を製造するステップであって、前記複数の内側クラディングアーム、前記複数の中間クラディングアーム、および前記複数の外側クラディングアームのそれぞれは複数のチャンバを含む、ステップと、

前記内側セグメント本体と、前記中間セグメント本体のセグメントと、前記外側セグメント本体のセグメントと、を層に組み立てるステップであって、前記セグメント本体は、溶接および接着のうち1つにより組み立てられるステップと、

核分裂性の燃料組成および減速材のうち1つを前記複数のチャンバに配置して燃料装荷層を形成するステップと、

複数の前記燃料装荷層を前記核分裂原子炉構造に組み立てるステップと、  
を含む、  
方法。

10

#### 【請求項 2 3】

前記内側セグメント本体と、前記中間セグメント本体のセグメントと、前記外側セグメント本体のセグメントとは、積層造形プロセスを使用して製造される、

請求項 2 2 に記載の方法。

#### 【請求項 2 4】

前記核分裂原子炉構造を半径方向反射体の内部に位置するステップを含み、

前記核分裂原子炉構造は、円筒形状を有する、

請求項 2 2 に記載の方法。

20

#### 【請求項 2 5】

請求項 1 に記載の核分裂原子炉構造を製造する方法であって、

前記内側セグメント本体と、前記中間セグメント本体と、前記外側セグメント本体とを含む層を単一の構造として製造するステップであって、前記複数の内側クラディングアーム、前記複数の中間クラディングアーム、および前記複数の外側クラディングアームのそれぞれは複数のチャンバを含む、ステップと、

核分裂性の燃料組成および減速材のうち1つを前記複数のチャンバに配置して燃料装荷層を形成するステップと、

複数の前記燃料装荷層を前記核分裂原子炉構造に組み立てるステップと、  
を含む、  
方法。

30

#### 【請求項 2 6】

前記内側セグメント本体、前記中間セグメント本体、および前記外側セグメント本体の前記単一の構造は、積層造形プロセスを使用して製造される、

請求項 2 5 に記載の方法。

#### 【請求項 2 7】

前記核分裂原子炉構造を半径方向反射体の内部に位置するステップを含み、

前記核分裂原子炉構造は、円筒形状を有する、

請求項 2 5 に記載の方法。

#### 【発明の詳細な説明】

40

#### 【技術分野】

#### 【0 0 0 1】

本開示は、一般に、核分裂炉 ( f i s s i o n r e a c t o r )、および核分裂炉内の核分裂原子炉 ( n u c l e a r f i s s i o n r e a c t o r ) 空間に関する構造に関する。特に、核分裂性の核燃料組成を含む燃料要素などの熱生成構造は、クラディング ( c l a d d i n g ) などの格納構造により被覆されている。熱生成構造は、インポリユート曲線形状を有し、複数のそのような形状が組み立てられて、円筒型の原子炉層を形成する。インポリユート曲線形状は、円筒型の原子炉層の半径方向の位置に基づいて変化するが、インポリユート曲線形状の均一化により、所望の原子炉性能プロファイルを達成するためにそれぞれの熱生成構造に投入される燃料要素 (または減速材および/または妨

50

害物質 (poisons) などの他の特徴) の固有の形状の数を最小化する。熱生成構造のインボリュート曲線形状により、燃料要素およびクラディングの厚さを均一化することができる、および、個別の熱生成構造の間の冷却材空間を均一化することができる。本開示は、特に、熱生成構造の少なくともインボリュート曲線形状のクラディング構造の、積層造形プロセスによる製造に適合している。開示されている核分裂炉は、小型船舶 (宇宙船および人工衛星など) の動力源、核熱推進 (NTP: nuclear thermal propulsion)、および同位体生成を含む様々な用途で使用するのに適している。

#### 【背景技術】

##### 【0002】

以下の議論において、特定の構造および/または方法について言及する。しかし、以下の参考文献は、これらの構造および/または方法が従来技術を構成することを認めるものとして解釈されるべきではない。出願人は、そのような構造および/または方法が、本発明に対する先行技術としての的確でないことを証明する権利を明示的に留保する。

##### 【0003】

核分裂炉用の新しい熱生成機能および構造を設計する際に、核分裂原子炉空間全体にわたるそれぞれの燃料要素の十分な冷却は、しばしば制限的な設計因子である。1つ前の原子炉の設計において、ウラン燃料は、例えば、冷間圧延プロセスにより圧延金属板内に封入されていた。図1の概略図を参照すると、2つのクラッド層 (第1クラッド層4aおよび第2クラッド層4b) の間の燃料組成層2を含む層1の配置が、冷間圧延装置のローラ6のニップ (nip) に供給される。冷間圧延プロセスは、1つまたは複数の冷間圧延ステップにおいて、層1の配置の厚さを初期厚さから最終厚さまで減少させる。このプロセスにおいて、材料の様々な層 (図示されている例では、燃料組成層2、および、2つのクラッド層4aおよび4b) が、クラッド層4aおよび4bが燃料組成層2の両側に封入層を提供する単一層構造8 (図1において断面で示されている) に冶金学的に接合されて (metallurgically bonded) いる (図1において燃料組成層2と2つのクラッド層4aおよび4bとの間の界面に破線で示されている)。帯状または板状のいずれに形成されているかに関わらず、単一層構造8は、従来の金属成型技術を使用してさらに処理することができる。一実施例において、このような板状の単一層構造8をインボリュートの形状に湾曲させて、オークリッジ国立研究所 (ORNL: Oak Ridge National Laboratory) にある核研究用原子炉である高中性子束同位体反応炉 (HFIR: High Flux Isotope Reactor) 10の炉心アセンブリ (図1に部分断面図を示す) に組み込んでいる。HFIR設計において、インボリュート形状12は、均一化された冷却材空間の間に配置された均一な厚さのウラン/クラッドプレートを提供する。

##### 【0004】

HFIRにおける単一層構造およびインボリュート形状は、設計の柔軟性を低下させるいくつかの欠点を有する。例えば、中性子工学 (neutronic) および熱管理要件に準拠するために、燃料組成層2の組成は、板または帯内の位置に対して空間的に不均一であるとともに、炉心アセンブリ内の位置に基づいて調整される。しかし、同時に、単一層構造の組成および層分布は、燃料組成層2と2つのクラッド層4aおよび4bとのプロセス、例えば冷間圧延の際に固定される。したがって、HFIRのそれぞれの位置の構造は、独自に構築された単一層構造を有していなければならない、独自に構築された単一層構造は、他の形式では互換性がない。

#### 【発明の概要】

##### 【0005】

上記を考慮すると、炉心アセンブリにおけるクラッド燃料要素の形状、位置、および組成をより柔軟に変化させることがより有利であろう。さらに、核分裂原子炉設計における中性子工学および熱管理要件を満たすことは、クラッド燃料要素の幾何学および組成的な変化をより少なくしつつ、部品製造および核分裂原子炉の組み立ての複雑性も減少させ

10

20

30

40

50

ることができるため有利であろう。さらに、モジュール化され反復性があり、十分な大きさの寸法の設計により、積層造形などの製造方法の適用が可能になる。

#### 【0006】

核分裂原子炉の炉心設計における燃料要素の中性子工学および熱性能は、とりわけ、例えば、形状、大きさ、および相対位置などの燃料要素、燃料要素を囲むクラディング、および冷却材チャンネルの構造により、および燃料要素、クラディング、および冷却材の熱輸送特性により、影響を受ける。上記のように、燃料要素の中性子工学および熱性能を満たしつつ、設計および製造の柔軟性および信頼性を向上させるために、代替設計が必要とされる。

#### 【0007】

代替設計の一例（図2参照）では、一連の半径方向に同心の燃料リング32を含む層（層の60度部分30が図2に示されている）を円筒形の核分裂原子炉空間に組み立てる。それぞれの燃料リング32において、燃料リングのエッジ34aと内部ウェビング34bとは、クラディングとして機能し、ボウタイ（bow tie）形状を有する燃料組成36を含む容積を画定する。エッジ34aとウェビング34bとはまた、図2において断面に円形の形状を有する冷却材チャンネル38の形状を画定することができる。燃料組成36を含む容積は、燃料リング32のそれぞれにおいて同じ断面積を有する。同様に、それぞれの燃料リング32における冷却材チャンネル38は、同じ断面積を有する。中性子工学および熱管理の目的のために、それぞれの燃料リング32は、異なる燃料組成（一定の燃料断面積の場合）または異なる燃料形状（一定の燃料組成の場合）を必要とする。例えば、リング32bに適合するサイズの燃料組成は、リング32fで使用することはできず、また、中性子工学および熱管理の観点からもうまく動作させることができない。したがって、さらなる例において、図2に示す10個のリング設計は、1つまたは複数の燃料組成および燃料形状が変化するいくつかの異なる燃料を必要とするであろう。

#### 【0008】

代替設計の別の例（図3Aおよび図3Bに示す）は、部分50内に同心円状かつ放射状に分布した燃料要素54用のポケット52を含む層（層の15度部分50が図3Aおよび図3Bに示されている）を組み立てる。複数の部分50は、円筒形状の核分裂原子炉空間に組み立てることができる。図2の例と比較すると、図3Aおよび図3Bの例は、燃料要素54の形状をボウタイ形状からより三角形または矩形の形状に変更している。楕円形の冷却材孔56が、それぞれのポケット52の間のクラッドウェブ構造58に配置されている。図2の例と同様に、それぞれ異なる大きさおよび位置の燃料要素54は、異なる燃料組成または異なる燃料形状を必要とし、全体として、図3Aおよび図3Bの例においても、1つまたは複数の燃料組成および燃料形状が変化する十分大きい数の異なる燃料を必要とするであろう（ボウタイ形状からより三角形または矩形形状への変化により、このような要素の製造を単純化するだけでなく様々な燃料組成を有するこのような要素の製造を単純化するが）。しかし、図3Aおよび図3Bに示す設計のための中性子工学および熱性能の分析は、燃料要素のための種々の異なる形状および位置のうち、適切に冷却することのできる唯一の燃料要素形状が、半径方向の最も外側の位置の薄い形状の燃料要素54a、すなわち、長さとの比率が最も大きい燃料要素であることを証明した。

#### 【0009】

上記2つの例は、構造が中性子工学および熱性能基準を満たす核分裂炉のための熱生成機能および構造の設計における課題を示し、製造の複雑性と製造のばらつきとを低減する（そして、それによって製造上の欠陥の可能性を低減する）ために十分に共通の設計であり、および/または十分少ないばらつきを有している。

#### 【0010】

一般に、本開示は、核分裂性の核燃料組成を含む燃料要素がインボリュート曲線の形状を有する封入クラディング構造の軸に沿って配置された核分裂原子炉構造に関する。複数のそのようなインボリュート曲線形状のクラディング構造がリングを形成するように配置され、複数の同心リングが核分裂原子炉構造の層を形成するように配置される。複数の層

10

20

30

40

50

自体が組み立てられて、核分裂原子炉構造を形成する。例示的な実施の形態において、核分裂原子炉構造は、核分裂原子炉の活性炉心 ( a c t i v e c o r e ) 領域である。

【 0 0 1 1 】

本明細書に開示される実施の形態はまた、複数の層を含む核分裂原子炉構造をも含む。複数の層のそれぞれの層は、内側セグメント本体の第1側面から内側セグメント本体の第2側面まで軸方向に延びる内側開口部を含む内側セグメント本体と、内側セグメント本体の半径方向外側にある中間セグメント本体と、中間セグメント本体の半径方向外側にある外側セグメント本体と、を含む。第1内部接触面 ( i n t e r i o r i n t e r f a c e ) は、内側セグメント本体と中間セグメント本体とを分離し、第2内部接触面は、中間セグメント本体と外側セグメント本体とを分離する。軸方向に延びる内側開口部に垂直な平面における断面平面図において、内側セグメント本体は、内側開口部に隣接する第1半径方向内側端部から第1内部接触面の第1半径方向外側端部までらせん状に外側に放射する ( r a d i a t e s ) 第1インボリュート曲線形状を有する複数の内側クラディングアームを含む。中間セグメント本体は、第1内部接触面に隣接する第2半径方向内側端部から第2内部接触面の第2半径方向外側端部までらせん状に外側に放射する第2インボリュート曲線形状を有する複数の中間クラディングアームを含む。外側セグメント本体は、第2内部接触面に隣接する第3半径方向内側端部から外側セグメント本体の半径方向外側表面の第3半径方向外側端部までらせん状に外側に放射する第3インボリュート曲線形状を有する複数の外側クラディングアームを含む。

10

【 0 0 1 2 】

本明細書に開示される実施の形態はまた、本明細書に開示される複数の層を備える核分裂原子炉を含む。複数の層は、第1端面と、第2端面と、第1端面を第2端面に接続する外側面と、を有する核分裂原子炉構造に組み立てられる。また、活性炉心構造の外側面の周囲に配置された半径方向反射体 ( r a d i a l r e f l e c t o r ) と、圧力容器と、圧力容器の開口を介して活性炉心構造と流体連通する冷却材システムと、も含まれる。

20

【 0 0 1 3 】

本明細書に開示される実施の形態はまた、本明細書に開示される核分裂原子炉構造を製造する方法をも含む。方法は、内側セグメント本体と、中間セグメント本体のセグメントと、外側セグメント本体のセグメントと、を製造することと、ここで、複数の内側クラディングアーム、複数の中間クラディングアーム、および複数の外側クラディングアームのそれぞれは、複数のチャンバを含む、内側セグメント本体と、中間セグメント本体のセグメントと、外側セグメント本体のセグメントと、を層に組み立てることと、ここで、セグメント本体は、溶接および接合のうち1つにより組み立てられる、核分裂性の燃料組成および減速材の1つを複数のチャンバに配置して燃料装荷層 ( f u e l - l o a d e d l a y e r ) を形成することと、複数の燃料装荷層を核分裂原子炉構造に組み立てることと、を含む。

30

【 0 0 1 4 】

本明細書に開示される核分裂原子炉構造を製造する方法の、代替的な実施の形態において、方法は、単一構造として、内側セグメント本体と、中間セグメント本体と、外側セグメント本体と、を含む層を製造することと、ここで、複数の内側クラディングアーム、複数の中間クラディングアーム、および複数の外側クラディングアームのそれぞれは、複数のチャンバを含む、核分裂性の燃料組成および減速材の1つを複数のチャンバに配置して燃料装荷層を形成することと、複数の燃料装荷層を核分裂原子炉構造に組み立てることと、を含む。

40

【 0 0 1 5 】

さらに、開示された原子炉および炉心は、複雑な機械的形状を有するが、元素金属または金属合金の3D印刷などの積層造形技術を使用して層ごとに一体的かつ反復的に製造することにより、本明細書に開示される構造および特徴をより容易に製造することができる。

【 0 0 1 6 】

上述の概要、ならびに実施の形態の以下の詳細な説明は、添付の図面と併せて読むとよ

50

り良く理解することができる。図示された実施の形態は、正確な配置および手段に限定されるものではないことを理解されたい。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】先行技術の高中性子束同位体反応炉(HFIR)におけるクラッド燃料構造の形成に関連する構造およびプロセスを概略的に示す図

【図2】第1の実施の形態において、組み立てられた層が一連の半径方向に同心の燃料リングを含む設計の層の60度部分を概略的に示す図

【図3A】第2の実施の形態において、同心円状かつ放射状に分布した燃料要素用のポケットを含む設計の層の15度部分を概略的に示す図

10

【図3B】ポケットに部分的に挿入された燃料要素を有する同じ部分を概略的に示す図

【図4】活性炉心領域が、それぞれ第1インポリュート曲線形状を有するクラディングアームを含む一連の同心セグメント本体を有する第3の実施の形態の層から組み立てられた核分裂原子炉の簡略化した例を概略的に示す部分分解斜視図

【図5】層に組み立てられた、それぞれがインポリュート曲線形状を有する一連の同心セグメント本体を概略的に示す上面図

【図6A】内側セグメント本体の実施の形態を概略的に示す上面図

【図6B】図6Aに示す内側セグメント本体の部分拡大図

【図6C】クラディングアームの端部の表面特徴の例を示す図

【図7A】中間セグメント本体の実施の形態を概略的に示す上面図

20

【図7B】図7Aに示す中間セグメント本体の部分拡大図

【図8A】外側セグメント本体の実施の形態を概略的に示す上面図

【図8B】図8Aに示す外側セグメント本体の部分拡大図

【図9】クラディングアームのインポリュート形状の曲線の表面が内側セグメント本体、中間セグメント本体、および外側セグメント本体にわたって連続している例を示す図

【図10】内側クラディングアームのそれぞれが6つのチャンバを含むことができ、中間クラディングアームおよび複数の外側クラディングアームのそれぞれが2つのチャンバを含むことができる層の例を示す図

【図11】クラディングアームの例を概略的に示す図

【図12】内側本体セグメント502と、中間セグメント本体504と、外側セグメント本体と、を含む層の実施の形態を示す図であり、それぞれが複数のチャンバとそれぞれのセグメント本体の上に位置する複数の燃料組成本体を含む図

30

【図13A】本明細書に開示されるインポリュート曲線形状のクラディングアーム設計における熱分析研究の結果を示す図

【図13B】図13Aに示す内側セグメントクラディングアームの部分拡大図

【図14A】セグメント本体の様々な部分から層を組み立てるステップを示す流れ図

【図14B】セグメント本体の様々な部分から層を組み立てるステップを示す流れ図

【図14C】層への燃料組成および/または減速材組成ならびに妨害物質の装荷のステップを示す流れ図

【図14D】核分裂原子炉構造に複数の層を組み立てるステップを示す流れ図

40

【図15】核分裂原子炉構造に組み立てられた複数の層を含む核分裂原子炉の実施の形態を概略的に示す側面断面図

【発明を実施するための形態】

【0018】

見やすくするために、いくつかの例では、図中の名前の付いた特徴の一部だけに参照符号が付されている。

【0019】

図4は、核分裂原子炉100の簡略化された例示的な実施の形態を概略的に示す部分分解図である。核分裂原子炉100は、第1端面106と、第2端面108と、活性炉心構造104の長手方向軸112に沿って配置された第1端面106と第2端面108とを接

50

続する外側面 110 と、を有する核分裂原子炉炉心構造 104 に組み立てられた複数の層 102 を備える。層 102 は、本明細書でさらに説明されるように、内側セグメント本体と、中間セグメント本体と、外側セグメント本体と、第 1 内部接触面と、第 2 内部接触面と、により画定される。核分裂原子炉 100 はまた、活性炉心構造 104 の外側面 110 の周囲に配置された半径方向反射体 114 も備える。活性炉心構造 104 は円筒構造で示されているが、活性炉心構造が任意の中性子工学および熱管理特性を示す限り、任意の適切な幾何学的形状を利用することができる。例示的な実施の形態において、活性炉心構造 104 は、活性炉心構造の直径 ( $D_{RX}$ ) に対する活性炉心領域の長さ ( $L_{RX}$ ) の比率が約 1 (すなわち、 $L_{RX} / D_{RX} = 1 \pm 0.05$ ) であるよう、十分な層 102 を有する。一般に、半径方向反射体 114 は、そうでなければ逃げてしまう中性子を炉心に散乱 (または反射) させることにより、核分裂原子炉 100 の中性子漏洩を低減する。このため、設計上の実効増倍率 ( $k_{eff}$ ) を増加させ、臨界を維持するために必要な燃料の量を低減する。压力容器および压力容器の開口を介して活性炉心構造に流体連通する冷却材システム (压力容器 120 および冷却材システム 130 として概略的に示されている) もまた提供される。

10

#### 【0020】

任意の適切な半径方向反射体、压力容器、および冷却材システムを核分裂原子炉 100 に組み込むことができる。例えば、冷却材システムは、液体ベースであっても気体ベースであってもよい。冷却材システムが気体ベースである場合、断面がアニュラス (annulus) 形状を有する気密の解放円筒形状を提供するよう、外周面、すなわち隣接する層 102 の外側面に対応する接触面と、内周面とで、溶接接合を用いて隣接する層 102 に一緒に溶接することにより、複数の層 102 を活性炉心構造 104 に組み立てることができる。気体ベースの冷却材システムでは、活性炉心領域の全体を気体が巡回することが許容されるため、最外面のみが気密性を有していればよい。冷却材システムが液体ベースである場合、冷却材チャンネルが互いに分離している一方で、それぞれが第 1 端部から第 2 端部まで活性炉心構造を横切る冷却材の連続経路を提供するよう、隣接する層 102 の対向する面は互いに接合される。

20

#### 【0021】

1 つの層 102 における冷却材チャンネルなどの特徴 (features) と、隣接する層 102 における特徴とを位置合わせすることを支援するために、位置合わせ補助器具 (alignment aids) を使用することができる。隣接する層 102 の隣接する表面上にある受け入れ空間に、例えば、挿入することによりまたは受け入れられることにより、嵌合または挿入された 1 つの層 102 の表面の突出したレジストリ特徴 (registry features) を使用するクロッキング技術を適用することができる。ピン、ノッチ、成形された突起などを含む他のレジストリ特徴を使用することもできる。さらに、位置合わせチャンネルまたはスクライブマークなどの他の位置合わせ補助器具を使用することもできる。また、位置合わせ補助器具は、隣接する内面および連続的な外側面 110 を含む 1 つまたは複数の様々な適切な表面に配置することができる。

30

#### 【0022】

開示される核分裂原子炉構造は、複数の層を備える。それぞれの層は、一連の同心に配置されたセグメント本体を含む。それぞれのセグメント本体は、インポリュート曲線形状を有するクラディングアームを含む。図 5 は、一連の同心セグメント本体 210、240、270 を概略的に示す上面図である。これらのそれぞれは、層 200 に組み立てられた第 1 インポリュート曲線形状を有するクラディングアームを含む。例示的な実施の形態において、核分裂原子炉構造は、内部セグメント本体 210 と、中間セグメント本体 240 と、外側セグメント本体 270 と、を備える。中間セグメント本体 240 は、内側セグメント本体 210 の半径方向外側にあり、外側セグメント本体 270 は中間セグメント本体 240 の半径方向外側にある。接触面は、半径方向に隣接する連続したセグメント本体から 1 つのセグメント本体を分離する。例えば、第 1 内部接触面 212 は、内側セグメント本体 210 と中間セグメント本体 240 とを分離し、第 2 内部接触面 242 は、中間

40

50

セグメント本体 2 4 0 と外側セグメント本体 2 7 0 とを分離する。

【 0 0 2 3 】

核分裂原子炉構造は、核分裂原子炉構造の第 1 軸方向端部から核分裂原子炉構造の第 2 軸方向端部まで軸方向に伸びる内側開口部を含む（通常、核分裂原子炉構造の長手方向軸に対応する）。この内側開口部は、冷却材チャンネルとして機能することができるが、（冷却材チャンネルと組み合わせ、または冷却材チャンネルとは別に）原子炉制御装置、制御棒、センサ、または放射性同位元素製造装置を収容するよう機能することもできる。それぞれの層は、複数の層が核分裂原子炉構造に組み立てられている場合に内側開口部の一部を画定する、対応する内側開口部を有する。

【 0 0 2 4 】

図 5 は、層に対する上面図、および組み立てられた核分裂原子炉に対する断面の平面図における、軸方向に伸びる内側開口部 2 0 2 の軸に垂直な平面のそれぞれにおける、層 2 0 0 の実施の形態を示す。層 2 0 0 は、層 2 0 0 の第 1 側面 2 0 4 から層 2 0 0 の第 2 側面 2 0 6 まで軸方向に伸びる内側開口部 2 0 2 を含む内側セグメント本体 2 1 0 を含む。層 2 0 0 はまた、内側セグメント本体 2 1 0 の半径方向外側にある中間セグメント本体 2 4 0 と、中間セグメント本体 2 4 0 の半径方向外側にある外側セグメント本体 2 7 0 と、を含む。同心に配置されたセグメント本体 2 1 0、2 4 0、2 7 0 は、互いに接合されて、接触面で層 2 0 0 を形成している。セグメント本体を接合して、任意の適切な手段により接触面を形成することができる。いくつかの実施の形態において、セグメント本体を接合して、溶接により接触面を形成することができる。他の実施の形態において、セグメント本体を接合して、圧縮フィッティング (compression fitting) により接触面を形成することができる。いずれの場合も、第 1 内部接触面 2 1 2 は内側セグメント本体 2 1 0 と中間セグメント本体 2 4 0 とを分離し、第 2 内部接触面 2 4 2 は、中間セグメント本体 2 4 0 と外側セグメント本体 2 7 0 とを分離する。

【 0 0 2 5 】

図 6 A は、内側セグメント本体 2 1 0 に対する上面図、および組み立てられた核分裂原子炉構造に対する断面の平面図において、それぞれの場合、軸方向に伸びる内部開口部 2 0 2 の軸に垂直な平面で、内側セグメント本体 2 1 0 の実施の形態を示す。図 6 B は、図 6 A に示す内側セグメント本体 2 1 0 の部分 P 1 を示す拡大図である。内側セグメント本体 2 1 0 は、内部開口部 2 0 2 に隣接する第 1 半径方向内側端部 2 1 6 から、組み立てられた層 2 0 0 で第 1 内部接触面 2 1 2 の一部を形成するまたは一部である外側エッジ 2 2 0 の第 1 半径方向外側端部 2 1 8 まで、らせん状に外側に放射する第 1 インポリュート曲線形状を有する複数の内側クラディングアーム 2 1 4 を含む。複数の内側クラディングアーム 2 1 4 は、複数のチャンバ 2 2 2 を含む。複数のチャンバ 2 2 2 は、内側クラディングアーム 2 1 4 の長さに沿って分布している。それぞれのクラディングアーム 2 1 4 において、それぞれのチャンバ 2 2 2 がウェブ 2 2 4 により囲まれて、第 1 チャンバ 2 2 2 a がウェブ 2 2 4 の一部により隣接するチャンバ 2 2 2 b から分離するよう、それぞれのチャンバ 2 2 2 は、内側セグメント本体 2 1 0 を形成する材料のウェブ 2 2 4 の内部に含まれている。本明細書で説明するように、チャンバ 2 1 4 は、核分裂性の燃料組成（または、減速材および妨害物質などの他の組成）を含み、ウェブ 2 2 4 は、核分裂性の燃料組成または他の組成のクラディングとして機能する。

【 0 0 2 6 】

1 つまたは複数の冷却材開口部 2 3 0 は、1 つのクラディングアーム 2 1 4 の複数のチャンバ 2 2 2 と隣接する内側クラディングアーム 2 1 4 の複数のチャンバ 2 2 2 と（例えば、1 つの内側クラディングアーム 2 1 4 a のチャンバ 2 2 2 c と隣接するクラディングアーム 2 1 4 b のチャンバ 2 2 2 d と（図 6 B 参照））の間に配置される。冷却材開口部 2 3 0 は、内側クラディングアーム 2 1 4 を通って、内側セグメント本体 2 1 0 の厚さ方向に、内側セグメント本体 2 1 0 の第 1 側面 2 0 4 ' から内側セグメント本体 2 1 0 の第 2 側面 2 0 6 ' まで伸びる。

【 0 0 2 7 】

10

20

30

40

50

冷却材開口部 230 は、様々な形態であり得る。例えば、内側セグメント本体 210 のウェブ 224 が単一の本体である場合、冷却材開口部 230 は、最初のウェブ製造中に、例えば、積層造形プロセスの層ごとの堆積プロセス中に、ウェブに形成することができる、または、ウェブ製造後に、ドリル (drilling)、フライス (milling)、プランジフライス (plunge milling) 等の材料除去プロセスにより、または放電加工機 (EDM: electrical discharge machining) プロセスを使用して、ウェブに形成することができる、1つまたは複数の通路、チャネル、または他の開口部である。別の例では、それぞれのクラディングアーム 214 が単一の本体として形成され、複数のクラディングアーム 214 が内側セグメント本体 210 を形成するよう接合されている場合、冷却材開口部 230 は、内側クラディングアーム 214 のエッジ、すなわち、内側セグメント本体 210 の第 1 側面 204 ' を形成する内側クラディングアーム 214 の表面と、内側セグメント本体 210 の第 2 側面 206 ' を形成する内側クラディングアーム 214 の表面と、内側クラディングアーム 214 の第 1 半径方向内側端部 216 の表面と、内側クラディングアーム 214 の第 1 半径方向外側端部 218 の表面と、により境界を定められたエッジにある特徴により形成される、通路または他の開口部である。これに関して、クラディングアーム 214 のエッジは、隣接するクラディングアーム 214 のエッジにより接触する場合、1つまたは複数の通路、チャネル、または他の開口部を形成する、溝、リブ、突起、または他の表面特徴を含んでもよい。

10

#### 【0028】

20

いくつかの実施の形態において、表面特徴は、エッジの周辺に沿って位置する目立たない領域である。他の実施の形態において、表面特徴は、少なくとも 1 つの対向する側面に沿って、連続的にまたは不連続的に、内側セグメント本体の第 1 側面に向かう第 1 端部から内側セグメント本体の第 2 側面に向かう第 2 端部まで延びる。異なる表面特徴の組み合わせもまた実施することができる。さらに、表面特徴は、クラディングアームの 1 つのエッジのみに存在してもよいし、クラディングアームの両方のエッジに配置されていてもよい。一例として、表面特徴は突起である。突起の非限定的な例には、バンプ (bumps)、ノブ (knobs)、またはメサのような (mesa-like) 特徴と共通点のある特徴が含まれ、規則的な形状または不規則な形状の両方が含まれる。

#### 【0029】

30

表面特徴は、突起が突出している少なくとも 1 つの対向する側面から遠位にある上面を有する。すぐ隣のクラディングアームを有するセグメント本体に組み立てられる場合、突起の上面はすぐ隣のクラディングアームの対向する側面に接触し、突起の高さまたは突出距離は、2 つのクラディングアームの間のスタンドオフ (stand-off) 分離を提供する。このスタンドオフ分離は、2 つのクラディングアームの間のチャネルを形成する。存在する場合、いくつかの実施の形態において、表面特徴の位置が第 1 チャンバ 222 a を隣接するチャンバ 222 b から分離するウェブ 224 の部分に一致しないよう、そのような表面特徴は、クラディングアーム 214 の半径方向に延びる長さに沿ってオフセットされていてもよい。異なる冷却材開口部の組み合わせもまた実施することができる。一例として、図 6 C は、クラディングアーム (この場合、内側クラディングアーム 214 の例) のエッジ上の表面特徴 (この場合、リブ 234) を示す。しかし、表面特徴は、同様に、エッジ面と 1 つまたは複数の内側クラディングアーム 214、中間クラディングアーム 244、および外側クラディングアーム 272 のいずれかまたは両方に存在し得る。

40

#### 【0030】

いくつかの実施の形態において、そうでなければ個々のクラディングアーム 214 またはクラディングアーム 214 のグループを接合することから存在するであろう開口部 202 の内径を形成する表面での溶接または他の構造を避けるよう、内側セグメント本体 210 が単一の本体として形成されることが好ましい。

#### 【0031】

50

内側クラディングアーム 214 のインボリュート曲線形状を見やすくするため、内側クラディングアーム 214 の実施の形態が、図 6 A に概略的に示されている。図示された実施の形態において、内側クラディングアーム 214 のインボリュート曲線形状の 2 つの曲線辺 (curving sides) 232 a、232 b は、1 つのクラディングアーム 214 における複数のチャンバ 222 と隣接するクラディングアーム 214 における複数のチャンバ 222 との間に位置するウェブ 224 の中間点に接続する線に位置する。インボリュート曲線形状自体は、第 1 半径方向内側端部 216 の中間点から第 1 半径方向外側端部 218 の中間点まで延びるインボリュート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、幅が一定 (すなわち、幅が内側クラディングアーム 214 のインボリュート曲線形状の 2 つの対向する曲線辺 232 a、232 b の間の距離) であってもよい。あるいは、インボリュート曲線形状は、第 1 半径方向内側端部 216 の中間点から第 1 半径方向外側端部 218 の中間点まで延びるインボリュート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、幅が変化してもよい。例えば、インボリュート曲線形状は、第 1 半径方向内側端部 216 の中間点から第 1 半径方向外側端部 218 の中間点まで延びるインボリュート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、幅が増加し続けてもよい、または幅が減少し続けてもよい。

10

#### 【0032】

図 7 A は、中間セグメント本体 240 に対する上面図、および組み立てられた核分裂原子炉構造に対する断面の平面図において、それぞれの場合、軸方向に延びる内部開口部 202 の軸に垂直な平面で、中間セグメント本体 240 の実施の形態を示す。図 7 B は、図 7 A に示す中間セグメント本体 240 の部分 P2 を示す拡大図である。図 7 A において、中間セグメント本体 240 は、層 200 を形成する内側セグメント本体 210 および外側セグメント本体 270 の文脈で示されている。

20

#### 【0033】

中間セグメント本体 240 は、組み立てられた層 200 において第 1 内部接触面 212 を形成するまたはその一部である内側開口部 248 に隣接する第 2 半径方向内側端部 246 から、組み立てられた層 200 において第 2 内部接触面 242 を形成するまたはその一部である外側エッジ 256 にある第 2 半径方向外側端部 250 までらせん状に外側に放射する第 2 インボリュート曲線形状を有する内側クラディングアーム 244 を含む。複数の中間クラディングアーム 244 は、少なくとも 1 つのチャンバ 252 を含む、あるいは、複数のチャンバ 252 a、252 b (例えば、図 9 および図 10 も参照) を含む。図 7 B において、チャンバ 252 は、2 つの中間クラディングアーム 244 にのみ示されているが、追加の中間クラディングアーム 244、代替的にすべての中間クラディングアーム 244 が 1 つまたは複数のチャンバ 252 を含むこともできる。チャンバ 252 は、中間クラディングアーム 244 の長さに沿って延びる、または、複数のチャンバが含まれる場合、チャンバ 252 a、252 b は、中間クラディングアーム 244 の長さに沿って分布する。それぞれの中間クラディングアーム 244 において個別のチャンバ 252 がウェブ 254 に封入されるよう、チャンバ 252 (または、複数のチャンバが含まれる場合、チャンバ 252 a、252 b) は、中間セグメント本体 240 を形成する材料のウェブ 254 内に含まれる。さらに、複数のチャンバ 252 が含まれる場合、第 1 チャンバ 252 a は、ウェブ 254 の部分により隣接するチャンバ 252 b から分離される (図 9 および図 10 も参照)。本明細書で説明するように、チャンバ 252 は、核分裂性の燃料組成 (または、減速材および妨害物質などの他の組成) を含むことができ、ウェブ 254 は、核分裂性の燃料組成または他の組成のためのクラディングとして機能する。

30

40

#### 【0034】

内側セグメント本体 210 と同様に、中間セグメント本体 240 は、1 つの中間クラディングアーム 244 にあるチャンバ 252 または複数のチャンバ 252 a、252 b と隣接する中間クラディングアーム 244 にある複数のチャンバ 252 または複数のチャンバ 252 a、252 b との間に位置することのできる 1 つまたは複数の冷却材開口部 258 を含むことができる。冷却材開口部 258 は、中間クラディングアーム 244 を通

50

って、中間セグメント本体 2 4 0 の厚さ方向に、中間セグメント本体 2 4 0 の第 1 側面 2 0 4 ' ' から中間セグメント本体 2 4 0 の第 2 側面 2 0 6 ' ' まで延びる。

【 0 0 3 5 】

また、内側セグメント本体 2 1 0 と同様に、中間セグメント本体 2 4 0 に関連する冷却材開口部 2 5 8 は、様々な形態であり得る（中間セグメント本体 2 4 0 に関連する冷却材開口部 2 5 8 は内側セグメント本体 2 1 0 にある冷却材開口部 2 3 0 と同一であっても異なっている（例えば、中間セグメント本体 2 4 0 のウェブ 2 5 4 が単一の本体である場合、冷却材開口部は、最初のウェブ製造中に、例えば、積層造形プロセスの層ごとの堆積プロセス中に、ウェブに形成することができる、またはウェブ製造後に、ドリル、フライス、ブランチフライス等の材料除去プロセスにより、または放電加工機（EDM）プロセスを使用して、ウェブに形成することができる、1つまたは複数の通路、チャンネル、または他の開口部である。別の例では、それぞれの中間クラディングアーム 2 4 4 が単一の本体として形成され、複数の中間クラディングアーム 2 4 4 が中間セグメント本体 2 4 0 を形成するよう接合されている場合、冷却材開口部 2 5 8 は、中間クラディングアーム 2 4 4 のエッジ、すなわち、中間セグメント本体 2 4 0 の第 1 側面 2 0 4 ' ' を形成する中間クラディングアーム 2 4 4 の表面と、中間セグメント本体 2 4 0 の第 2 側面 2 0 6 ' ' を形成する中間クラディングアーム 2 4 4 の表面と、中間クラディングアーム 2 4 4 の第 2 半径方向内側端部 2 4 6 の表面と、中間クラディングアーム 2 4 4 の第 2 半径方向外側端部 2 5 0 と、により境界を定められたエッジにある表面特徴により形成される、通路または他の開口部であり得る。これに関して、クラディングアーム 2 4 4 のエッジは、隣接する中間クラディングアーム 2 4 4 のエッジにより接触する場合、1つまたは複数の通路、チャンネル、または他の開口部を形成する、溝、リブ、または他の表面特徴を含んでもよい。これに関して、中間クラディングアーム 2 4 4 のエッジは、内側クラディングアーム 2 1 4 および図 6 C に関して本明細書に説明されたおよび/または示された表面特徴のいずれかを含むことができる。存在する場合、いくつかの実施の形態において、表面特徴の位置が第 1 チャンバ 2 5 2 a を隣接するチャンバ 2 5 2 b から分離するウェブ 2 5 4 の一部と一致しないよう、そのような表面特徴は、半径方向に延びる中間クラディングアーム 2 4 4 の長さに沿ってオフセットされてもよい。異なる冷却材開口部の組み合わせもまた実施することができる。

【 0 0 3 6 】

いくつかの実施の形態において、そうでなければ個々の中間クラディングアーム 2 4 4 または中間クラディングアーム 2 4 4 のグループを接合することから存在するであろう開口部 2 4 8 の内径を形成する表面 2 6 0 での溶接または他の構造を避けるよう、中間セグメント本体 2 4 0 が単一の本体として形成されることが好ましい。いくつかの実施の形態において、開口部 2 4 8 の内径を形成する表面 2 6 0 および中間セグメント本体 2 4 0 の外側エッジ 2 5 6 の一方または両方は、（表面 2 6 0 に見られるように）滑らかな表面であってもよく、または、（外側エッジ 2 5 6 の表面に見られるように）一連の山と谷とを有する畝（ridge）であってもよい。開口部 2 4 8 を形成する表面 2 6 0 および外側エッジ 2 5 6 の表面の形態は、組み立てられた層 2 0 0 の内部にあるそれらが隣接する表面に対して相補的であってもよい。しかし、完全に相補的でない場合、冷却材チャンネルとして機能することができる隙間が存在してもよい、または、アダプタ構造を使用して、接触面で不適合な（non-conforming）表面を嵌合させることができる。例えば、第 1 内部接触面は、第 1 端部から第 2 端部まで活性炉心構造を横断する複数の二次冷却材チャンネルを含むことができる。また、表面が相補的でない場合、アダプタ構造を使用して、接触面で不適合な表面を嵌合させることができる。さらなる代替案として、二次冷却材チャンネルとアダプタ構造との組み合わせも実施することができる。

【 0 0 3 7 】

中間クラディングアームのインボリュート曲線形状を見やすくするために、中間クラディングアーム 2 4 4 の実施の形態を図 7 A に概略的に示す。図示された実施の形態において、中間クラディングアーム 2 4 4 のインボリュート曲線形状の 2 つの曲線辺 2 6

2 a、2 6 2 bが、1つの中間クラディングアーム2 4 4におけるチャンバ2 5 2または複数のチャンバ2 5 2 a、2 5 2 bと隣接する中間クラディングアーム2 4 4におけるチャンバ2 5 2または複数のチャンバ2 5 2 a、2 5 2 bとの間に位置するウェブ2 5 4の中間点に接続された線に位置する。インボリュート曲線形状自体は、第2半径方向内側端部2 4 6の中間点から第2半径方向外側端部2 5 0の中間点まで延びるインボリュート曲線形状の軸方向に沿った位置の関数として、一定の幅（すなわち、幅が、中間クラディングアーム2 4 4のインボリュート曲線形状の2つの対向する曲線辺2 6 2 a、2 6 2 bの間の距離である場合）であってもよい。あるいは、インボリュート曲線形状は、第2半径方向内側端部2 4 6の中間点から第2半径方向外側端部2 5 0の中間点まで延びるインボリュート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、幅が変化してもよい。例えば、インボリュート曲線形状は、第2半径方向内側端部2 4 6の中間点から第2半径方向外側端部2 5 0の中間点まで延びるインボリュート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、幅が増加し続けてもよい、または幅が減少し続けてもよい。

10

#### 【0038】

図8 Aは、外側セグメント本体2 7 0に対する上面図、および組み立てられた核分裂原子炉構造に対する断面の平面図において、それぞれの場合、軸方向に延びる内側開口部2 0 2の軸に垂直な平面で、外側セグメント本体2 7 0の実施の形態を示す。図8は、図8 Aに示す外側セグメント本体2 7 0の部分P 3を示す拡大図である。

#### 【0039】

外側セグメント本体2 7 0は、組み立てられた層2 0 0において第2内部接触面2 4 2を形成するまたはその一部である内側開口部2 7 6に隣接する第3半径方向内側端部2 7 4から、組み立てられた層2 0 0において半径方向最外エッジを形成するまたはその一部である（または、追加のセグメント本体が図示された3つを超えて含まれる場合、組み立てられた層2 0 0においてさらなる接触面を形成するまたはその一部である）外側エッジ2 8 0にある第3半径方向外側端部2 7 8までらせん状に外側に放射する第3インボリュート曲線形状を有する外側クラディングアーム2 7 2を含む。複数の外側クラディングアーム2 7 2は、少なくとも1つのチャンバ2 8 2を含む、あるいは、複数のチャンバ2 8 2 a、2 8 2 b（例えば、図9および図10も参照）を含む。図8 Bにおいて、チャンバ2 8 2は、2つの外側クラディングアーム2 7 2にのみ示されているが、追加の外側クラディングアーム2 7 2、代替的にすべての外側クラディングアーム2 7 2が1つまたは複数のチャンバ2 8 2を含むこともできる。チャンバ2 8 2は、外側クラディングアーム2 7 2の長さに沿って延びる、または、複数のチャンバが含まれる場合、チャンバ2 8 2 a、2 8 2 bは、外側クラディングアーム2 7 2の長さに沿って分布する。それぞれの外側クラディングアーム2 7 2において個別のチャンバ2 8 2がウェブ2 8 4に封入されるよう、チャンバ2 8 2（または、複数のチャンバが含まれる場合、チャンバ2 8 2 a、2 8 2 b）は、外側セグメント本体2 7 0を形成する材料のウェブ2 8 4内に含まれる。さらに複数のチャンバ2 8 2が含まれる場合、第1チャンバ2 8 2 aは、ウェブ2 8 4の部分により隣接するチャンバ2 8 2 bから分離される（図9および図10も参照）。本明細書で説明するように、チャンバ2 8 2は核分裂性の燃料組成（または、減速材および妨害物質などの他の組成）を含むことができ、ウェブ2 8 4は核分裂性の燃料組成または他の組成のためのクラディングとして機能する。

20

30

40

#### 【0040】

内側セグメント本体2 1 0および中間セグメント本体2 4 0と同様に、外側セグメント本体2 7 0は、1つの外側クラディングアーム2 7 2にあるチャンバ2 8 2または複数のチャンバ2 8 2 a、2 8 2 bと隣接する外側クラディングアーム2 7 2にあるチャンバ2 8 2または複数のチャンバ2 8 2 a、2 8 2 bとの間に位置することのできる1つまたは複数の冷却材開口部2 8 6を含むことができる。冷却材開口部2 8 6は、外側クラディングアーム2 7 2を通して、外側セグメント本体2 7 0の厚さ方向に、外側セグメント本体2 7 0第1側面2 0 4 ' ' 'から外側セグメント本体2 7 0の第2側面2 0 6 ' ' 'まで延びる。

50

## 【 0 0 4 1 】

また、内側セグメント本体 2 1 0 および中間セグメント本体 2 4 0 と同様に、外側セグメント本体 2 7 0 に関連する冷却材開口部 2 8 6 は、様々な形状であり得る（外側セグメント本体 2 7 0 に関連する冷却材開口部 2 8 6 は、中間セグメント本体 2 4 0 にある冷却材開口部 2 5 8 および内側セグメント本体 2 1 0 にある冷却材開口部 2 3 0 の 1 つまたは複数と同一であっても異なってもよいが）。例えば、外側セグメント本体 2 7 0 のウェブ 2 8 4 が単一の本体である場合、冷却材開口部は、最初のウェブ製造中に、例えば、積層造形プロセスの層ごとの堆積プロセス中に、ウェブに形成することができる、またはウェブ製造後に、ドリル、フライス、プランジフライス等の材料除去プロセスにより、または放電加工機（EDM）プロセスを使用して、ウェブに形成することができる、1 つまたは複数の通路、チャンネル、または他の開口部である。別の例では、それぞれの外側クラッディングアーム 2 7 2 が単一の本体として形成され、複数の外側クラッディングアーム 2 7 2 が外側セグメント本体 2 7 0 を形成するよう接合されている場合、冷却材開口部 2 8 6 は、外側クラッディングアーム 2 7 2 のエッジ、すなわち、外側セグメント本体 2 7 0 の第 1 側面 2 0 4 ' ' ' を形成する外側クラッディングアーム 2 7 2 の表面と、外側セグメント本体 2 7 0 の第 2 側面 2 0 6 ' ' ' を形成する外側クラッディングアーム 2 7 2 の表面と、外側クラッディングアーム 2 7 2 の第 3 半径方向内側端部 2 7 4 の表面と、外側クラッディングアーム 2 7 2 の第 3 半径方向外側端部 2 7 8 の表面と、により境界を定められたエッジにある表面特徴により形成される、通路または他の開口部であり得る。これに関して、外側クラッディングアーム 2 7 2 のエッジは、隣接する外側クラッディングアーム 2 7 2 のエッジにより接触する場合、1 つまたは複数の通路、チャンネル、または他の開口部を形成する、溝、リブ、または他の表面特徴を含んでもよい。これに関して、中間クラッディングアーム 2 4 4 のエッジは、内側クラッディングアーム 2 1 4 および図 6 C に関して本明細書に説明されたおおよび / または示された表面特徴のいずれかを含むことができる。存在する場合、いくつかの実施の形態において、表面特徴の位置が、第 1 チャンバ 2 8 2 a を隣接するチャンバ 2 8 2 b から分離するウェブ 2 8 4 の部分と一致しないよう、そのような表面特徴は、半径方向に延びる外側クラッディングアーム 2 7 2 の長さに沿ってオフセットされてもよい。異なる冷却材開口部の組み合わせもまた実施することができる。

## 【 0 0 4 2 】

いくつかの実施の形態において、開口部 2 7 6 の内径を形成する表面 2 8 8 および外側セグメント本体 2 7 0 の外側エッジ 2 8 0 の一方または両方は、（表面 2 8 8 に見られるように）滑らかな表面であってもよく、または、（外側エッジ 2 8 0 の表面に見られるように）一連の山と谷とを有する畝であってもよい。開口部 2 7 6 の内径を形成する表面 2 8 8 の形態は、組み立てられた層 2 0 0 の内部にあるそれらが隣接する表面に対して相補的であってもよい。また、さらなるセグメント本体が外側セグメント本体 2 7 0 の半径方向外側にある場合、外側エッジ 2 8 0 の表面の形態は、組み立てられた層 2 0 0 の内部にあるそれが隣接する表面と相補的であってもよい。しかし、表面が完全に相補的でない場合、冷却材チャンネルとして機能することができる隙間が存在してもよい。例えば、第 2 内側接触面は、第 1 端部から第 2 端部まで活性炉心構造を横断する複数の二次冷却材チャンネルを含むことができる。また、これらの表面が完全に相補的でない場合、アダプタ構造を使用して接触面で不適合な表面を嵌合させることができる。さらなる代替案として、二次冷却材チャンネルとアダプタ構造との組み合わせも実施することができる。

## 【 0 0 4 3 】

外側クラッディングアームのインボリュート曲線形状を見やすくするために、外側クラッディングアーム 2 4 4 の実施の形態を図 8 A に概略的に示す。図示された実施の形態において、外側クラッディングアーム 2 7 2 のインボリュート曲線形状の 2 つの曲線辺 2 9 2 a、2 9 2 b が、1 つの外側クラッディングアーム 2 7 2 におけるチャンバ 2 8 2 または複数のチャンバ 2 8 2 a、2 8 2 b と隣接する中間クラッディングアーム 2 7 2 におけるチャンバ 2 8 2 または複数のチャンバ 2 8 2 a、2 8 2 b との間に位置するウェブ 2 8 4 の中間点に接続された線に位置する。インボリュート曲線形状自体は、第 3 半径方向内

側端部 274 の中間点から第 3 半径方向外側端部 278 の中間点まで延びるインボリユート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、一定の幅（すなわち、幅が、外側クラディングアーム 244 のインボリユート曲線形状の 2 つの対向する曲線辺 292 a、292 b の間の距離である場合）であってもよい。あるいは、インボリユート曲線形状は、第 3 半径方向内側端部 274 の中間点から第 3 半径方向外側端部 278 の中間点まで延びるインボリユート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、幅が変化してもよい。例えば、インボリユート曲線形状は、第 3 半径方向内側端部 274 の中間点から第 3 半径方向外側端部 278 の中間点まで延びるインボリユート曲線形状の軸に沿った位置の関数として、幅が増加し続けてもよい、または幅が減少し続けてもよい。

#### 【0044】

いくつかの実施の形態において、集合的に考慮すると、第 1 インボリユート曲線形状、第 2 インボリユート曲線形状、および第 3 インボリユート曲線形状は、共通のインボリユート曲線形状を共有している。したがって、内側クラディングアームの表面、中間クラディングアームの表面、および外側クラディングアームの表面は、内側開口部から外側セグメント本体の半径方向外側表面まで延びる連続したインボリユート曲線形状を形成する。例えば、図 9 に示すように、内側クラディングアームの第 1 インボリユート曲線形状の曲線辺 232 a、232 b の表面が第 1 内部接触面 212 を横切って突出している場合、突起は、中間クラディングアームの第 2 インボリユート曲線形状の曲線辺 262 a、262 b の表面と一致する。結果として、内側クラディングアームの第 1 インボリユート曲線形状の曲線辺 232 a、232 b の表面と、中間クラディングアームの第 2 インボリユート曲線形状の曲線辺 262 a、262 b の表面とを含む 1 つの連続したインボリユート曲線形状が存在する。さらなる例として、上述の連続したインボリユート曲線形状が、第 2 内部接触面 242 を横切ってさらに突出している場合、突起はまた、外側クラディングアームの第 3 インボリユート曲線形状の曲線辺 292 a、292 b の表面とも一致する。このさらなる突起の結果として、内側クラディングアームの第 1 インボリユート曲線形状の曲線辺 232 a、232 b の表面、中間クラディングアームの第 2 インボリユート曲線形状の曲線辺 262 a、262 b の表面、および外側クラディングアームの第 3 インボリユート曲線形状の曲線辺 292 a、292 b の表面を含む 1 つの連続したインボリユート曲線形状が存在する。また、図 9 に示すように、第 1 インボリユート曲線形状、第 2 インボリユート曲線形状、および第 3 インボリユート曲線形状のそれぞれは、内側開口部から外側セグメント本体の半径方向外側表面まで延びる連続したインボリユート曲線形状の異なる部分に対応する。

#### 【0045】

他の実施の形態において、内側クラディングアームの第 1 インボリユート曲線形状の曲線辺 232 a、232 b の表面、中間クラディングアームの第 2 インボリユート曲線形状の曲線辺 262 a、262 b の表面、および外側クラディングアームの第 3 インボリユート曲線形状の曲線辺 292 a、292 b の表面は、連続したインボリユート曲線形状の曲率に対応するが、1 つまたは複数のセグメント本体は、隣接するセグメント本体に対して回転している。表面の整列を維持する量子化された値よりも小さく回転すると、回転により、曲線辺の表面が、連続したインボリユート曲線形状の突起から回転方向にオフセットされることとなる。そのような配置において、関連する影響を受ける接触面のそれぞれの側のクラディングアームのインボリユート曲線形状の曲線辺の表面は、ステップ変化により接続されているという点で不連続である。

#### 【0046】

さらに他の実施の形態において、集合的に考慮すると、第 1 インボリユート曲線形状、第 2 インボリユート曲線形状、および第 3 インボリユート曲線形状は、異なる曲率を有している。したがって、内側クラディングアームの表面、中間クラディングアームの表面、および外側クラディングアームの表面は、内側開口部から外側セグメント本体の半径方向外側表面まで延びる不連続なインボリユート曲線形状を形成する。このような実施の形態では、図 5 に例示された層 200 に示されている。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 7 】

いくつかの実施の形態において、内側クラディングアームの表面、中間クラディングアームの表面、および外側クラディングアームの表面のいくつかまたはすべては、不連続なインポリュート曲線形状を形成するが、そのような表面は、依然として集合的に、同じ方向に、すなわち、右回り（時計回り）方向（図 5 に示す）、または左回り（反時計回り）方向のいずれかに、半径方向にらせん状になる。

## 【 0 0 4 8 】

さらにさらなる実施の形態において、第 1 インポリュート曲線形状、第 2 インポリュート曲線形状、および第 3 インポリュート曲線形状の 1 つまたは複数（ただしすべてではない）は、共通のインポリュート曲線形状を共有する。したがって、内側クラディングアームの表面、中間クラディングアームの表面、および外側クラディングアームの表面のいくつかは、それぞれの表面を横切って延びる連続したインポリュート曲線形状を形成する。一方、内側クラディングアームの表面、中間クラディングアームの表面、および外側クラディングアームの表面の他の部分は、それぞれの表面を横切って延びる不連続なインポリュート曲線形状を形成する。

## 【 0 0 4 9 】

図 6 A ~ 図 6 B、図 7 A ~ 図 7 B、および図 8 A ~ 図 8 B に示されて説明された実施の形態において、複数の内側クラディングアーム、複数の中間クラディングアーム、および複数の外側クラディングアームのそれぞれは、個別に、1 つまたは複数のチャンバを含んでもよい。いくつかの実施の形態において、内側クラディングアームは、中間クラディングアームまたは外側クラディングアームのいずれよりも多くのチャンバを有する。例えば、図 5 に示すように、内側セグメント本体 2 1 0 の内側クラディングアームはそれぞれ、6 つのチャンバ 2 2 2 を含むことができ（図 6 A のチャンバ 2 2 2 も参照）、中間クラディングアームおよび複数の外側クラディングアームのそれぞれは、1 つのチャンバ（それぞれ 2 5 2 および 2 8 2）を含む（図 7 B のチャンバ 2 5 2 および図 8 B のチャンバ 2 8 2 も参照）。別の例として図 1 0 に示すように、内側クラディングアームはそれぞれ、6 つのチャンバ 2 2 2 を含むことができ（図 6 A のチャンバ 2 2 2 も参照）、中間クラディングアームおよび複数の外側クラディングアームは、2 つのチャンバ（それぞれ 2 5 2 および 2 8 2）を含む。例示的な実施の形態において、1 つの内側クラディングアーム、1 つの中間クラディングアーム、および 1 つの外側クラディングアームにあるチャンバの総数は、1 0 以下である。

## 【 0 0 5 0 】

図 1 0 はまた、中間セグメント本体 2 4 0 および外側セグメント本体 2 7 0 の代替的な実施の形態も示す。代替的な実施の形態において、複数のクラディングアームは、複数の中間クラディングアームを含むユニット 3 0 0 および複数の外側クラディングアームを含むユニット 3 1 0 などのユニット（unit）として製造される。ユニットとしてクラディングアームを製造することにより、積層造形プロセスを使用する場合に有利になる。さらに、ユニットとして製造する場合、ユニットはウェブを形成するためにより少ない材料を使用することができ（少なくとも部分的には、隣接するクラディングアームが、互いに隣接する位置にある分離したクラディングアームと比較して、これらの隣接するクラディングアームに含まれる任意のチャンバの間のウェブ材料をより少なくすることができるため）、完全なセグメント本体を組み立てるために必要な溶接接合の数を最小化することができる。

## 【 0 0 5 1 】

前述のように、クラディングアームの様々な例において、個別のチャンバはウェブにより囲まれている。通常、製造中に、ウェブは、チャンバの側面と底面とを形成し、上部などのチャンバの一方側は、最初は解放されており、核分裂性の燃料組成（または減速材および妨害物質などの他の組成）を装荷することができる。装荷の後、チャンバの一方の解放側は、ウェブに取り付けられるキャップにより閉じられる。

## 【 0 0 5 2 】

10

20

30

40

50

図 1 1 は、クラディングアーム 4 0 0 の例を概略的に示す図である。例示的なクラディングアーム 4 0 0 において、本明細書で議論されるいくつかの特徴が示されている。例えば、例示的なクラディングアーム 4 0 0 は、複数のチャンバ（図示された実施の形態において、3つのチャンバ 4 0 2 a、4 0 2 b、4 0 2 c）を有する。また、燃料組成 4 0 4 もまた示されている。燃料組成 4 0 4 は、装荷プロセスにおける異なる時点で示されている。一例において、燃料組成 4 0 4 は、チャンバへの挿入に適する寸法を有する、既に形成された本体 4 0 6 である。適する寸法には、本体 4 0 6 が燃料組成 4 0 4 の本体 4 0 6 の外表面とチャンバ 4 0 2 の内表面との間に熱伝達接触（thermal transfer contact）を有する大きさであることを含む。あるいは、本体 4 0 6 は、燃料組成 4 0 4 の本体 4 0 6 の外表面とチャンバ 4 0 2 の内表面との間のスタンドオフ距離が最小であり、動作温度で融解する塩または金属などの熱伝達物質もまた、チャンバ 4 0 2 に装荷される。また、核分裂ガスを収容する容積および核分裂反応による容積変化だけでなく、あらゆる熱膨張による容積変化など、核分裂反応および昇温での動作の副生成物を収容できるように、本体 4 0 6 の容積は、チャンバ 4 0 2 の容積よりも十分に小さい。チャンバ 4 0 2 b に関連して見られるように、燃料組成の本体 4 0 6 はチャンバに挿入され、チャンバ 4 0 2 c に関連して見られるように、キャップ 4 0 8 は、例えばチャンバの開口の周辺を形成するウェブの部分にキャップを溶接することにより、チャンバを閉鎖する。キャップ 4 0 8 により閉鎖されると、チャンバは環境から隔離され、燃料組成 4 0 4 は、クラディングアーム 4 0 0 のウェブにより囲まれる（または、キャップがチャンバを閉鎖した後ウェブの一部ではないとみなされる場合、クラディングアーム 4 0 0 のウェブとキャップとの組み合わせにより囲まれる）。

10

20

#### 【 0 0 5 3 】

クラディングアーム 4 0 0 の実施の形態において示される別の例示的な特徴は、クラディングアーム 4 0 0 の 1 つのエッジ 4 2 2 の表面特徴 4 2 0 である。前述のように、エッジ 4 2 2、4 2 4 のいずれか一方または両方は、セグメント本体の第 1 側面を形成する / 形成するであろうクラディングアーム 4 0 0 の表面 4 2 6、セグメント本体の第 2 側面を形成する / 形成するであろうクラディングアーム 4 0 0 の表面 4 2 8、クラディングアーム 4 0 0 の半径方向内側端部の表面 4 3 0、およびクラディングアーム 4 0 0 の半径方向外側端部の表面 4 3 2、により境界を定められる。図 1 1 に図示された例において、表面特徴 4 2 0 は、エッジ 4 2 2 の表面上に延びるリップである。図 1 1 から容易に理解できるように、エッジ 4 2 2 が隣接するクラディングアームのエッジに接触すると、表面特徴 4 2 0 は、表面特徴 4 2 0 がエッジ 4 2 2 の表面上に延びる距離に対応する距離により、エッジ 4 2 2 の部分を隣接するクラディングアームのエッジからオフセットさせる。それにより、セグメント本体の第 1 側面を形成する / 形成するであろうクラディングアーム 4 0 0 の表面 4 2 6 からセグメント本体の第 2 側面を形成する / 形成するであろうクラディングアーム 4 0 0 の表面 4 2 8 まで延びるチャンネルを形成する。

30

#### 【 0 0 5 4 】

図 1 2 は、内側本体セグメント 5 0 2 と、中間セグメント本体 5 0 4 と、外側セグメント本体 5 0 6 と、を含む層 5 0 0 を示す図である。それぞれの本体セグメントは、複数のチャンバを有する。それぞれのセグメント本体の上には、形状（インボリュート曲線形状を含む）および燃料組成本体が装荷されるそれぞれのセグメント本体に存在するチャンバの数に対応する複数の燃料組成本体 5 0 8 が配置されている。例えば、燃料組成本体 5 0 8 a は、内側セグメント本体 5 0 2 の半径方向内側チャンバ 5 1 0 a に装荷され、燃料組成本体 5 0 8 g は、中間セグメント本体 5 0 4 の半径方向内側チャンバ 5 1 0 g に装荷され、燃料組成本体 5 0 8 j は、外側セグメント本体 5 0 6 の半径方向外側チャンバ 5 1 0 j に装荷される。さらに、いくつかの実施の形態において、それぞれの燃料組成本体内の燃料組成は変化し、クラディングアームに沿って異なる位置に、異なる核分裂性の燃料組成を含むチャンバが存在することになる。

40

#### 【 0 0 5 5 】

燃料組成に関して図 1 1 および図 1 2 に図示し説明したが、燃料組成がチャンバに装荷

50

される1つまたは複数の例では、減速材組成または妨害物質組成、または減速材組成または妨害物質組成の混合物により代替することができる。そのような代替は、原子炉の中性子工学設計および熱管理設計に従って実行することができる。

【0056】

図13Aおよび図13Bは、本明細書に開示されているインポリュート曲線形状のクラッディングアーム設計に関する熱解析研究の結果を示す。熱解析は、そのようなインポリュート曲線形状のクラッディングアーム設計を含む核分裂炉に基づいて実施された。図13Aのインポリュート曲線形状のクラッディングアーム設計は、6つの燃料組成本体602の第1セットを有するクラッディングアーム600（内側セグメント本体のクラッディングアームの実施の形態に対応する）と、4つの燃料組成本体606の第2セットを有するクラッディングアーム604（中間セグメント本体のクラッディングアームの実施の形態に対応する）と、4つの燃料組成本体610の第3セットを有するクラッディングアーム608（外側セグメント本体のクラッディングアームの実施の形態に対応する）と、を示す。全体として、熱解析により、それぞれのセグメント本体のクラッディングアームの両側で十分に冷却され、チャンバ内の燃料組成が溶融するのを防いでいることが示された。

【0057】

図13Aのクラッディングアームおよび燃料組成の中で、熱解析は、約1256.3K（凹面620および先端622でのクラッディングに対して）から最も高温の昇熱に対して最大2504.6Kまでの範囲の温度を示し、これは、半径方向外側端部（図13AのセクションP4に対応し、図13Bの拡大図で領域630aおよび530bとして示されている）に向かって配置された内側セグメント本体のクラッディングアームの領域で発生している。領域630aは、チャンバ602eの燃料組成本体に関連し、2227.2Kと2504.6Kとの間の温度で、内側セグメント本体のクラッディングアームの湾曲したエッジで発生する。この結果は、チャンバ602e内の燃料組成本体が動作中に膨張し、燃料組成本体の曲率の増加を引き起こした結果、燃料組成本体が領域630aのチャンバ602eの内表面で接触しなくなったと解釈された。燃料組成本体とチャンバ602eの内表面との間に形成されたこの隙間により、熱伝達が減少し、温度が上昇した。このテストは、塩または液体金属緩衝材などの熱伝達物質を含まないことに注意すべきである。熱伝達物質の存在により、隙間を埋めて熱伝達を改善し、領域620の温度を下げるのが期待される。しかし、領域620に配置された（collocated）ウェブの部分622は、2356.3Kと1395Kとの間のはるかに低い温度を維持する。

【0058】

本明細書に開示される、インポリュート曲線形状のクラッディングアーム、セグメント本体、および層は、任意の適切なプロセスにより製造することができる。図14A～図14Dは、セグメント本体（図14A～図14B、燃料組成および/または減速材組成と妨害物質との層（図14C）への装荷）の様々な部分からの層の組み立てと、核分裂原子炉構造（図14D）への複数の層の組み立てにおける例示的なステップを示す流れ図である。

【0059】

第1製造プロセスにおいて、インポリュート曲線形状のクラッディングアーム700は複数のチャンバを含み、インポリュート曲線形状のクラッディングアームのウェブは、冶金プロセスにより製造されるクラッディング構造を画定する。これらの冶金プロセスは、一例において、積層造形プロセスを含む。内側セグメント本体702の構造は、開口部の内径面の接合を最小化するために、単一の構造（図14Aに示すように）として形成されることが好ましい。さらに、適切な積層造形プロセスを使用して、内側セグメント本体702、中間セグメント本体704、および内側セグメント本体702の外側セグメント706構造の特徴を含む、層720の全体構造を、単一の構造として形成することができる。

【0060】

他の態様において、中間セグメント本体704を形成するインポリュート曲線形状のクラッディングアームと、外側セグメント本体706を形成するインポリュート曲線形状のクラッディングアームとは、個別に製造されて層に接合されてもよく、または、図14A

10

20

30

40

50

に示すように、層 7 2 0 ( 図 1 4 B 参照 ) に接合されたユニットを形成する単一の本体として形成されてもよい。

【 0 0 6 1 】

チャンバおよび冷却材開口部などのインポリュート曲線形状のクラディングアームの他の構造は、通常、プロセスのこの時点で製造される。それぞれのインポリュート曲線形状のクラディングアームにおけるチャンバは、開口部がチャンバを画定したままであるポイント、すなわち、側壁と 1 つの閉鎖端部を有するキャビティに、( 積層造形プロセスで、またはインポリュート曲線形状のクラディングアームの材料を機械加工することにより ) 最初に製造される。

【 0 0 6 2 】

インポリュート曲線形状のクラディングアームを接合して層 7 2 0 ( 図 1 4 B ) を形成することは、溶接および接合を含む任意の適切な手段により行うことができる。

【 0 0 6 3 】

層 7 2 0 を形成した後、チャンバに核分裂性の燃料組成 7 4 2 ( または減速材または妨害物質などの他の材料 ) が装荷される ( 図 1 4 C 参照、装荷プロセスが矢印で示されている ) 。必要に応じて、熱伝達物質もまた、チャンバ内に配置される。チャンバに装荷されると、キャップが開口部に配置され、例えば、溶接または熱間等静圧圧縮成形 ( H I P : hot isostatic pressing ) プロセスにより密閉されて、組み立てられたインポリュート曲線形状のクラディングアームが形成される。

【 0 0 6 4 】

次に、図 1 4 D に示すように、複数の組み立てられた層 7 4 0 は、さらに、核分裂原子炉構造 7 8 0 に組み立てられる。層は、冷却材開口部などの対応する内部構造に、一層ずつ重ねて配置される。前述のように、突出したレジストリ特徴を使用するクロッキング技術を位置合わせの目的で使用することができる。例示的な構築物において、最大 1 0 の層 7 4 0 が組み立てられて、核分裂原子炉構造 7 8 0 を形成する。層 7 4 0 の組み立ては、溶接または接着など、任意の適切な手段により行われる。さらに、プレート 7 8 2 を、核分裂原子炉構造 7 8 0 のいずれかの端部に配置することができる。プレートは、例えば、冷却材開口部に対応する、内側開口部に対応する、および / または軽装用開口部に対応するための適切な開口部を有することができる。組み立てられた核分裂原子炉構造 7 8 0 は、半径方向反射体 7 8 4 内に配置される。半径方向反射体は、燃料材料および炉心設計に基づき任意のものである。

【 0 0 6 5 】

いくつかの製造方法または製造方法のステップにおいて、インポリュート曲線形状のクラディングアームの部分、セグメント本体、および / または層は、例えば積層造形プロセスを使用して一体的な単一の構造として製造される。本明細書で使用されるように、積層造形プロセスには、層ごとに材料を積層することにより 3 D オブジェクトを構築する任意の技術が含まれる。適切な積層造形プロセスの例では、モリブデン含有金属合金、ジルカロイ - 4、または Hastelloy X などの金属合金の 3 D 印刷を利用して、前述の構造的特徴を形成する。他の実施の形態において、原料内に複数の金属を有する適切なマルチマテリアル積層造形プロセスが採用される場合、核分裂性の核燃料組成および / または熱伝達物質および / または減速材および / または妨害物質が、一体的な単一の構造内に含まれ得る。溶融金属が積層造形プロセスに含まれていない場合、積層造形プロセスは一時停止し、溶融金属の容積を燃料キャビティに配置し ( 液体または固体形状のいずれか ) 、積層造形プロセスを継続して閉鎖されたチャンバの構造を完成させることができる。原料内に複数の金属を有する適切なマルチマテリアル積層造形プロセスが採用される場合、使用することのできる他の合金として、合金鋼、ジルコニウム合金、およびモリブデンタングステン合金 ( 炉心シェル用 ) 、ベリリウム合金 ( 反射体用 ) 、およびステンレス鋼 ( 格納容器用 ) 、を含む。積層造形プロセスにより製造されない場合でも、本明細書に開示された様々な構造の製造において、上述の材料を使用することができる。

【 0 0 6 6 】

一体的な単一の構造の製造のための積層造形技術は、(a) 予測分析および原因分析、(b) 構造体の層ごとの製造中にマシンビジョンおよび加速プロセスと組み合わせた *in-situ* 監視、(c) 機械学習コンポーネントと組み合わせた自動分析、および (d) 完成した構造のデジタル表現の仮想検査、の追加のステップを含むことができる。さらに、積層造形技術は、複雑な形状を形成することができる。*in-situ* センサ、マシンビジョン画像、および人工知能と組み合わせると、積層造形技術は、構成要素が層ごとに積層造形されるため(多くの場合、これらの層は、50ミクロンのスケールである)、製造品質の調整が可能であり、そのような原子炉および構造の製造に予測品質保証を提供する。

**【0067】**

本明細書で使用されるように、クラディングは特徴を含む燃料の外装であり、冷却材と核燃料との間に位置する。クラディングは、放射性核分裂片が冷却材に漏れ出して混入することを防ぐ安全バリアとして機能する。クラディングのいくつかの設計上の制約には、中性子吸収、放射線耐性、および温度挙動などがある。クラディングは、通常、熱中性子に対する吸収断面積の小さい耐食性材料により形成される。例示的な材料としてジルカロイまたは鋼が含まれるが、原子炉の条件に適している場合、金属系およびセラミック系(Be、C、Mg、Zr、O、およびSi)など、他の材料を使用することもできる。いくつかの実施の形態において、クラディング材料は、高い中性子吸収断面積を有する同位体の還元を通じて反応性を高めるために同位体濃縮することができる。例えば、モリブデン濃縮Mo-92は、元素モリブデンよりも寄生的中性子吸収断面積が小さい。

**【0068】**

開示された核分裂炉に適用可能であり、熱生成源に含まれる適切な核分裂の核燃料組成は、濃縮度が20%未満の酸化ウラン、10wt%モリブデンを含むウラン(U-10Mo)、窒化ウラン(UN)、および他の安定した核分裂性の燃料組成を含む。可燃性の妨害物質もまた、含まれていてもよい。通常、核分裂性の核燃料組成は、セラミック材料の形態である。

**【0069】**

開示された核分裂炉に含まれ、燃料キャビティに含まれるのに適切な熔融金属は、ナトリウム(Na)、ナトリウムカリウム(NaK)、カリウム(K)、および鉄(Fe)である。

**【0070】**

様々な支持装置および補助装置を開示された核分裂炉に組み込むことができることが企図されている。例えば、減速材(水素化ジルコニウム(ZrH)、酸化ベリリウム(BeO)、水、およびグラファイトなど)、制御棒(イリジウム制御棒など)、および科学機器(温度センサまたは放射線検出器など)のうち少なくとも1つ、および同位体生成装置を、核分裂炉に組み込むことができる。さらに、制御棒もまた、中性子を吸収する中性子毒(neutron poison)を包含することができ、原子炉の臨界を調整するために使用することができる。中性子毒は、核分裂炉を停止するのに十分な中性子を吸収することができる(例えば、制御棒が完全に原子炉空間に挿入されている場合)、または核分裂炉の臨界を維持するために軸方向に配置することができる(例えば、制御棒が、核分裂連鎖反応を継続することのできる距離だけ炉心から引き出されている場合)。任意の適切な数の制御棒および減速材を使用することができ、所望の磁束プロファイル、出力分布および運転プロファイルの1つまたは複数を得るため、原子炉空間全体に適切に分散させることができる。例示的な実施の形態において、制御棒は、ねじ式であり、軸方向の空間を節約するのに貢献し、制御棒の直径を最大化し、信頼性の高いSCRAM動作のためにローラーナット(roller nut)に直接接触することを可能にする。制御棒のすべてまたは一部を、個別のモータにより個別に制御して、個別に反応性制御を提供することができる、および/またはパワーシェーピング(power shaping)を行うことができる。

**【0071】**

図15は、核分裂原子炉構造804に組み立てられた複数の層802を含み、核分裂原子炉構造804の長手方向軸806に沿って配置された核分裂原子炉800の実施の形態を概略的に示す側面断面図である。以前に開示され、本明細書の実施の形態で説明されたように、層802は、内側セグメント本体、中間セグメント本体、外側セグメント本体、第1内部接触面、および、第2内部接触面により画定される。核分裂原子炉800はまた、核分裂原子炉構造804の外側面の周りに配置された半径方向反射体810も含む。核分裂原子炉構造804は、適切な中性子工学および熱管理特性を示す限り、任意の適切な幾何学形状であってもよい。本明細書に記載されるように、活性炉心構造の直径( $D_{RX}$ )に対する活性炉心領域の長さ( $L_{RX}$ )の比率が約1(すなわち、 $L_{RX}/D_{RX} = 1 \pm 0.05$ )となるよう、例示的な実施の形態は十分な層802を有する。一般に、半径方向反射体810は、そうでなければ逃げてしまう中性子を炉心に散乱(または反射)させることにより、核分裂原子炉800からの中性子漏洩を低減する。このため、設計上の実効増倍率( $k_{eff}$ )を増加させ、臨界を維持するために必要な燃料の量を低減する。压力容器820は、とりわけ、核分裂原子炉構造804を取り囲み、活性炉心構造が冷却材システム(図示省略)と流体連通(冷却材の流れは矢印824により示される)することのできる開口部822を有する。核分裂原子炉に関連する様々な補助装置のいくつかも、図15に示されており、制御棒アセンブリ830と、核分裂原子炉構造804の内側開口部内で軸方向に移動可能なポイズンロッド(poison rod)832などの停止装置と、を含む。以前に開示され、本明細書の実施の形態で説明されたように、任意の適切な半径方向反射体、压力容器、および冷却材システムを、核分裂原子炉800に組み込むことができる。

10

20

#### 【0072】

開示された配置は、燃料要素または核分裂性の核燃料組成それ自体のいずれであっても、核分裂性の核燃料組成を含む熱生成源が、クラッキングにより囲まれている任意の構成に関連する。加圧水型原子炉(PWRリアクタ)および一次冷却材としての水に関連して本明細書に一般的に記載されているが、本明細書に開示された構造および方法は、他の原子炉システムにも適用することができる。これは、沸騰水型原子炉(BWRリアクタ)、CANDU炉などの重水素酸化物(重水)減速材原子炉、軽水炉(LWRリアクタ)、ペブルベッド炉(PBRリアクタ)、核熱推進炉(NTPRリアクタ)、商業炉および研究炉の両方を含み、ヘリウム、水素、メタン、熔融鹽、液体金属などの他の一次冷却材を利用する。本明細書に開示された熔融金属燃料パフファ技術を利用する場合、これらの様々な原子炉における任意の燃料クラッド構成は、より優れた炉心安全性および性能特性を生み出すことができる。

30

#### 【0073】

本明細書に開示された核分裂炉は、地上の電源、遠隔電力またはオフグリッド用途、宇宙電力、宇宙推進、同位体生成、指向性エネルギー用途、商業電力用途、および脱塩を含むがこれらに限定されない適切な用途で使用することができる。

#### 【0074】

特定の実施の形態について参照したが、他の実施の形態および変形例が、その精神および範囲から逸脱することなく、他の当業者により考案され得ることは明らかである。添付の特許請求の範囲は、すべてのそのような実施の形態および同等の変形例を含むよう解釈されることを意図している。

40



【 図 4 】

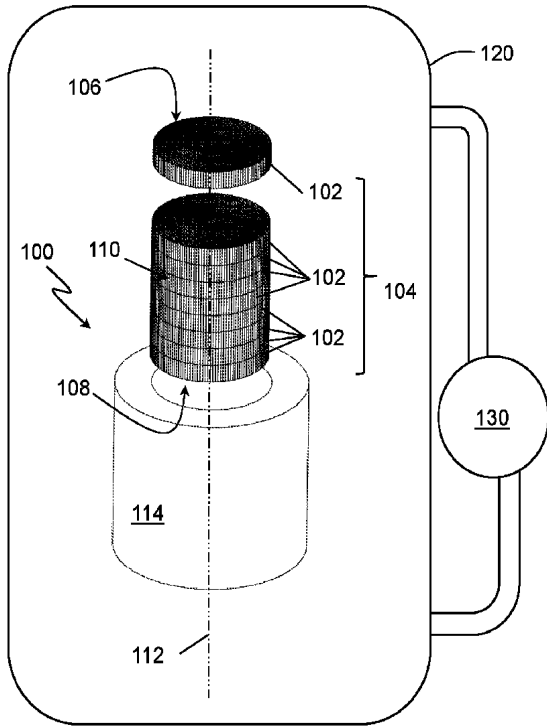


FIG. 4

【 図 5 】

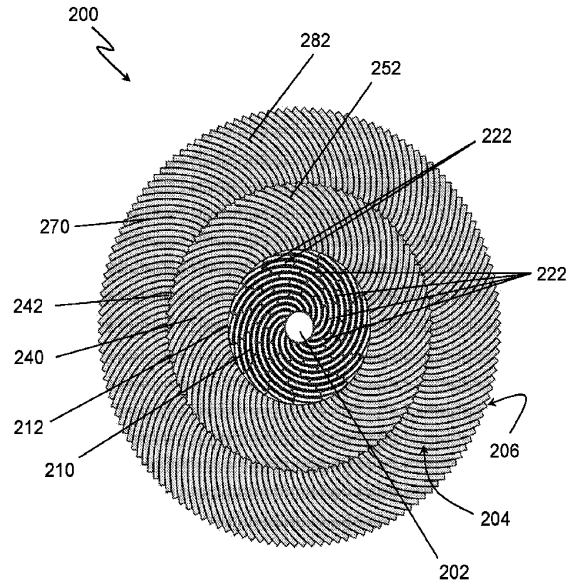
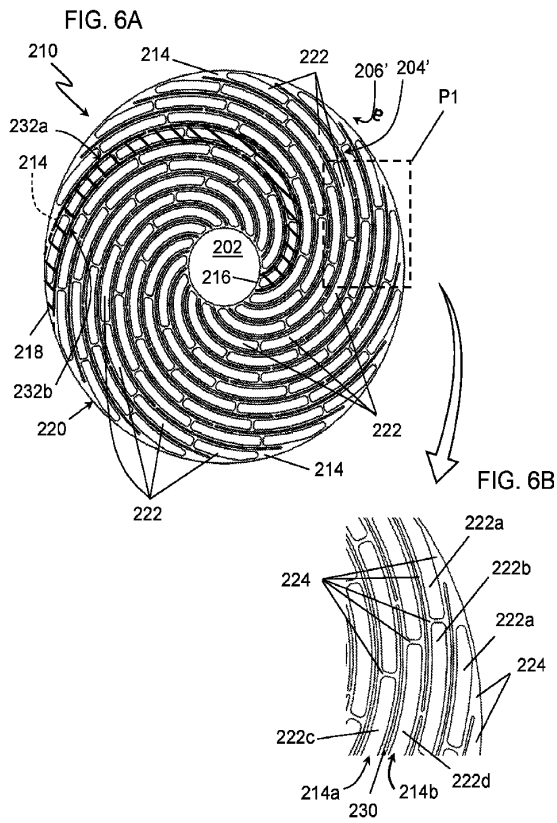


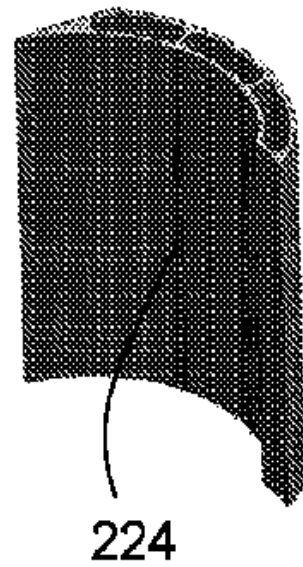
FIG. 5

【 図 6 A - 6 B 】



【 図 6 C 】

FIG. 6C



10

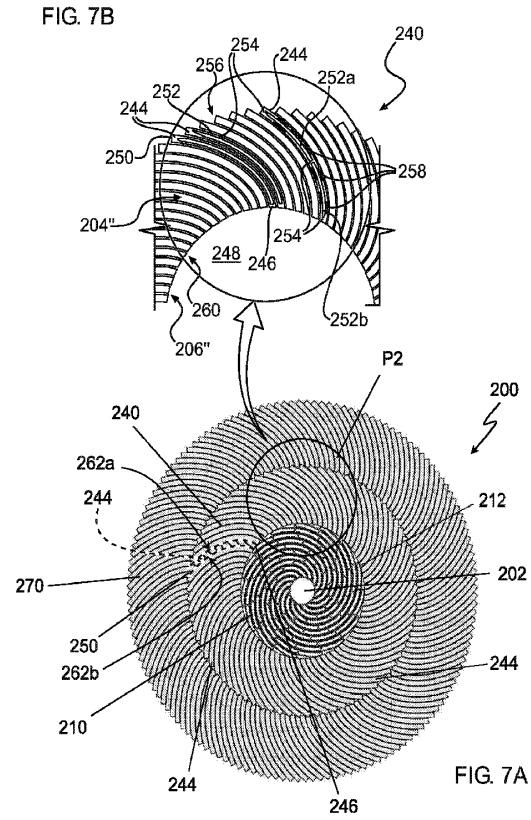
20

30

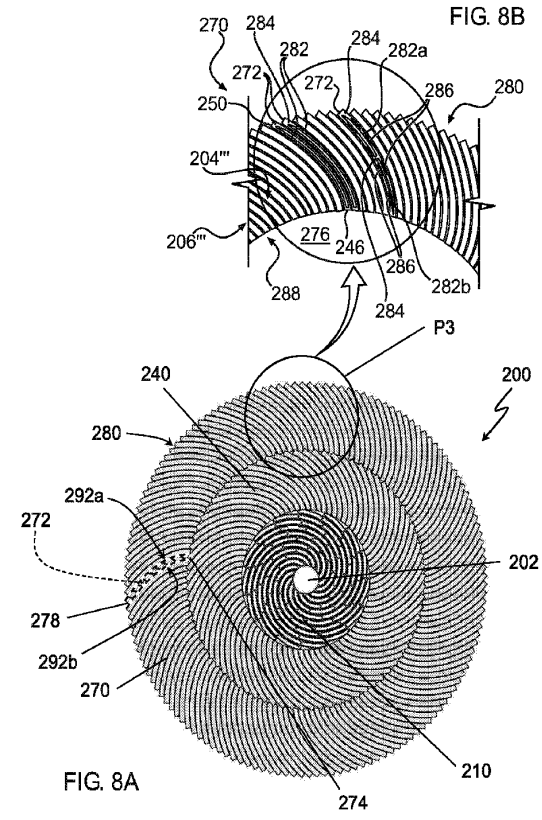
40

50

【 図 7 A - 7 B 】



【 図 8 A - 8 B 】



10

20

【 図 9 】

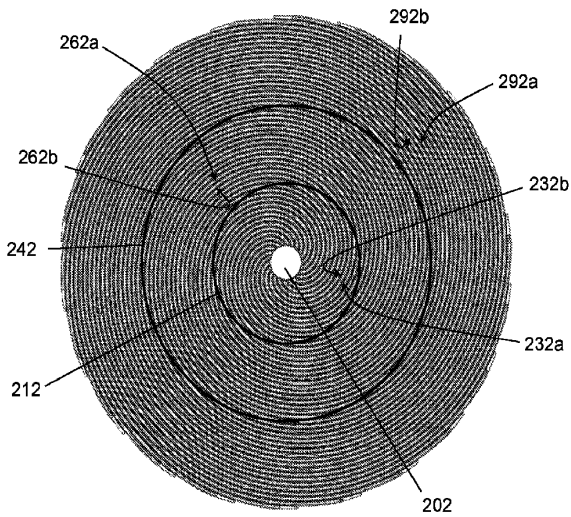


FIG. 9

【 図 10 】

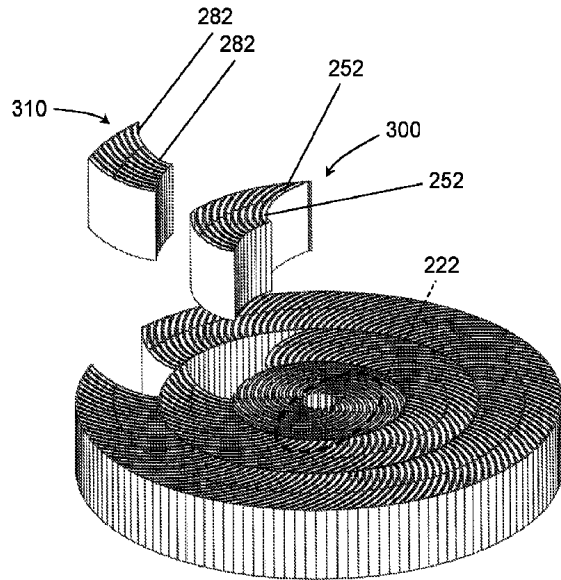


FIG. 10

30

40

50

【 図 1 1 】

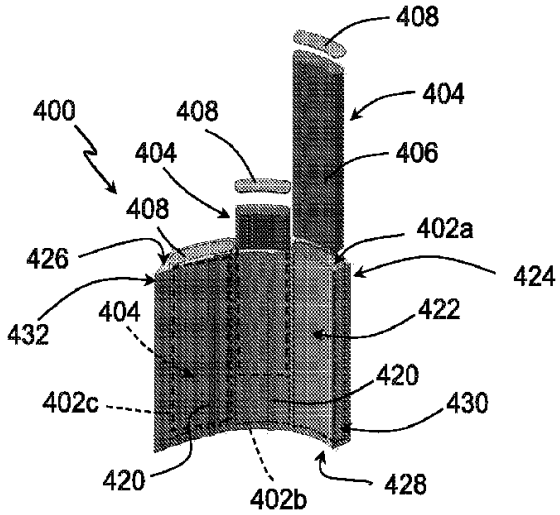


FIG. 11

【 図 1 2 】

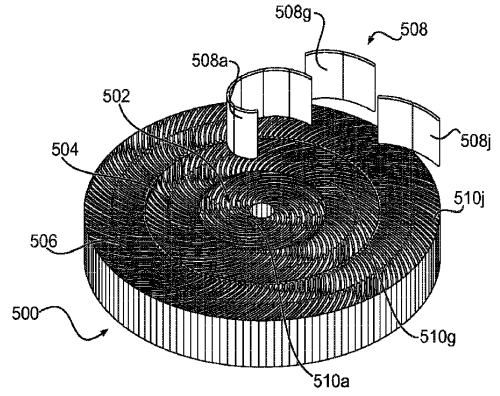


FIG. 12

10

【 図 1 3 A - 1 3 B 】

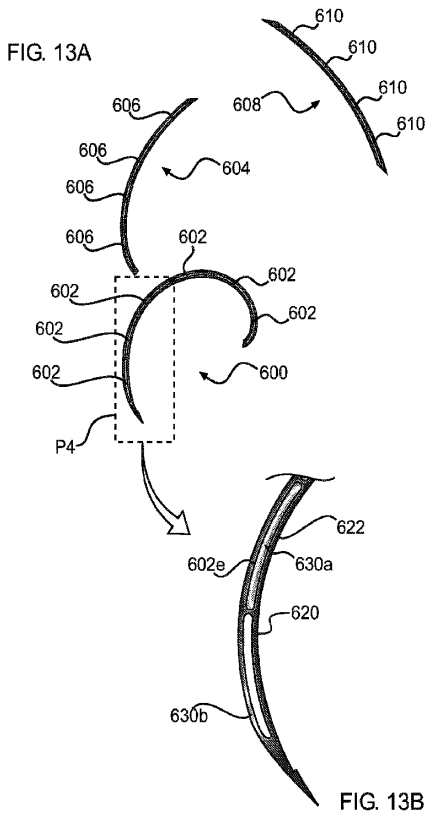


FIG. 13A

FIG. 13B

【 図 1 4 A - 1 4 D 】

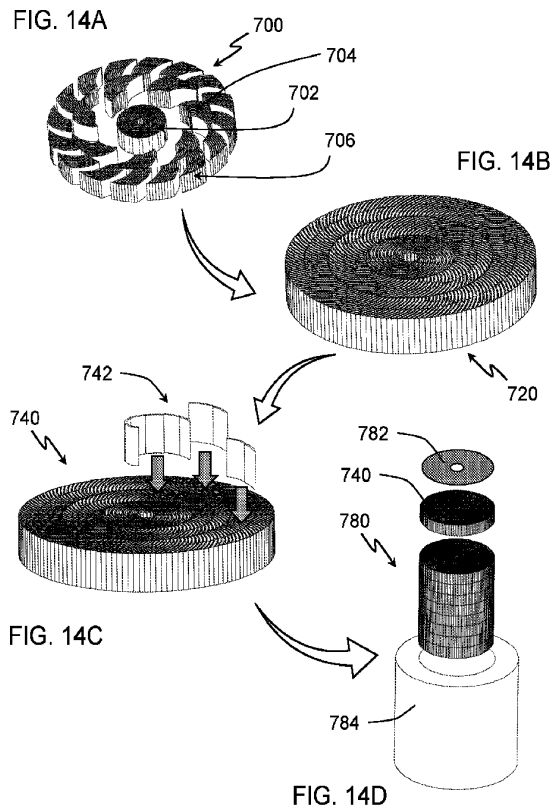


FIG. 14A

FIG. 14B

FIG. 14C

FIG. 14D

20

30

40

50

【 図 15 】

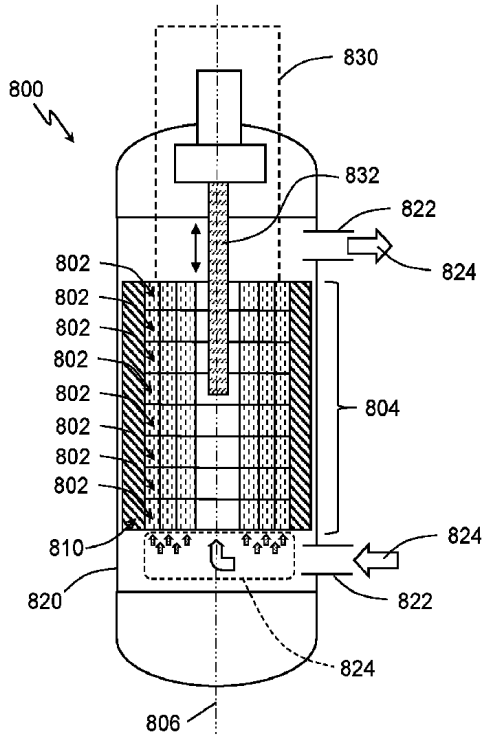


FIG. 15

10

20

30

40

50

---

フロントページの続き

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

(72)発明者 インマン, ジェイムズ ビー

アメリカ合衆国 2 8 2 7 7 ノースカロライナ州シャーロット、ノース・コミュニティ・ハウス・ロード 1 1 5 2 5、スウィート 6 0 0、ピーダブリューエックス・テクノロジーズ・インコーポレイテッド内

(72)発明者 バーグマン, ジョシュ ジェイ

アメリカ合衆国 2 8 2 7 7 ノースカロライナ州シャーロット、ノース・コミュニティ・ハウス・ロード 1 1 5 2 5、スウィート 6 0 0、ピーダブリューエックス・テクノロジーズ・インコーポレイテッド内

審査官 佐藤 海

(56)参考文献 米国特許第 0 3 2 7 4 0 6 4 ( U S , A )

特開平 0 7 - 1 2 0 5 7 5 ( J P , A )

特開 2 0 0 6 - 1 2 6 1 4 7 ( J P , A )

特公昭 3 8 - 0 1 6 4 4 7 ( J P , B 1 )

特開昭 5 6 - 1 3 3 6 8 1 ( J P , A )

特開平 0 1 - 1 7 2 7 9 7 ( J P , A )

特開昭 5 2 - 1 5 3 0 9 6 ( J P , A )

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G 2 1 C 3 / 3 6 , 5 / 0 0 - 5 / 2 2