

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7626762号
(P7626762)

(45)発行日 令和7年2月4日(2025.2.4)

(24)登録日 令和7年1月27日(2025.1.27)

(51)国際特許分類

F I

G 2 1 G 1/02 (2006.01)

G 2 1 G 1/02

G 2 1 K 5/08 (2006.01)

G 2 1 K 5/08

R

請求項の数 14 (全16頁)

(21)出願番号	特願2022-522331(P2022-522331)	(73)特許権者	521219442
(86)(22)出願日	令和2年10月14日(2020.10.14)		ウェスティングハウス エレクトリック
(65)公表番号	特表2022-553924(P2022-553924 A)		カンパニー エルエルシー
(43)公表日	令和4年12月27日(2022.12.27)		WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC
(86)国際出願番号	PCT/US2020/055640		アメリカ合衆国 16066 ペンシルベ
(87)国際公開番号	WO2021/076673		ニア, クランベリー タウンシップ, ウ
(87)国際公開日	令和3年4月22日(2021.4.22)		ェスティングハウス ドライブ 1000
審査請求日	令和5年10月12日(2023.10.12)		, 스위트 141
(31)優先権主張番号	62/914,661		1000 Westinghouse D
(32)優先日	令和1年10月14日(2019.10.14)		rive, Suite 141, Cr
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		anberry Township, P
			ennsylvania 16066 U
			nited States of Ame
			rica
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 モジュール式放射性同位体生成カプセルおよび関連方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

放射性同位体生成カプセルであって、
標的材料および中性子減速材のいずれか一方を収容するための内側容器と、
前記内側容器によって収容されない前記標的材料および前記中性子減速材のいずれか一方を収容するための、前記内側容器を取り囲む外側容器と、
前記中性子減速材から前記標的材料を隔離するためのクラッディングと、
隣接するカプセルを軸方向に接合するための係止部材と、
を備える、放射性同位体生成カプセル。

【請求項2】

前記内側容器は、クラッディング材料の内壁によって画定されている、請求項1に記載のカプセル。

【請求項3】

前記外側容器は、前記クラッディング材料の外壁と前記クラッディング材料の前記内壁との間に画定されている、請求項2に記載のカプセル。

【請求項4】

前記係止部材は、前記外側容器上に装着されている、請求項1から3のいずれか一項に記載のカプセル。

【請求項5】

前記係止部材は、クイックディスコネクト係止部材である、請求項1から4のいずれか

一項に記載のカプセル。

【請求項 6】

前記内側容器を前記外側容器内の所望の位置に保持するための支持部材をさらに備える、請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載のカプセル。

【請求項 7】

前記支持部材は、前記外側容器を形成するクラッディング材料の外壁から、前記内側容器を画定するクラッディング材料の内壁まで延在する支柱である、請求項 6 に記載のカプセル。

【請求項 8】

前記支柱は、原子炉内の温度で膨張して、前記外側容器の前記外壁と前記内側容器の前記内壁との間の前記支柱に対して圧入を提供する材料であって、原子炉内の前記温度より低い温度まで冷却されるときに収縮する前記材料から作製されている、請求項 7 に記載のカプセル。

10

【請求項 9】

前記内側容器の前記所望の位置は、前記外側容器内で軸方向に中心に位置する、請求項 6 から 8 のいずれか一項に記載のカプセル。

【請求項 10】

前記内側容器は円筒体であり、前記外側容器は前記内側容器の軸と同心の環状円筒体である、請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載のカプセル。

【請求項 11】

前記円筒体は前記中性子減速材を保持し、前記環状円筒体は照射のための前記標的材料を保持する、請求項 10 に記載のカプセル。

20

【請求項 12】

前記円筒体は照射用の前記標的材料を保持し、前記環状円筒体は前記中性子減速材を保持する、請求項 10 に記載のカプセル。

【請求項 13】

所望の放射性同位体を生成するための方法であって、

少なくとも 1 つのカプセルを提供することであって、各カプセルは、内側容器と、前記内側容器を取り囲む外側容器と、前記内側容器を前記外側容器から隔離するクラッディング材料と、隣接するカプセルを軸方向に接合するための係止部材と、を有する、提供することと、

30

照射時に前記所望の放射性同位体を生成する標的材料を、前記内側容器または前記外側容器のいずれか一方に挿入することと、

前記標的材料を前記クラッディング材料で取り囲んで、前記カプセル内の前記標的材料を隔離することと、

前記標的材料が挿入されていない残りの内側容器または外側容器のいずれか一方に中性子減速材を挿入することと、

標的材料および中性子減速材が充填された内側容器および外側容器を有する少なくとも 1 つのカプセルを、核燃料アセンブリの挿入コンポーネントに挿入することと、

40

標的材料に対して前記放射性同位体を形成するために前記標的材料を照射することと、

前記挿入コンポーネントから前記カプセルを取り外すことと、

を含む、方法。

【請求項 14】

前記照射された標的材料を前記カプセルから取り外すことと、前記所望の放射性同位体を前記照射された材料から分離することと、をさらに含む、請求項 13 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

関連出願の相互参照

本出願は、2019 年 10 月 14 日出願の「MODULAR RADIOISOTOPE

50

PRODUCTION CAPSULES」と題された米国特許仮出願第62／914，661号の利益を主張する。その内容は、参照により本明細書に組み込まれる。

【0002】

1. 技術分野

本開示は、放射性同位体に関し、より具体的には、原子力発電中の放射性同位体を捕獲するためのデバイスに関する。

【0003】

2. 背景技術の説明

放射性同位元素、または放射性同位体は、放射性元素によって放射されるガンマ線が腫瘍を検出するために使用される医学などの様々な産業、特定の細菌を殺すためにガンマ線への曝露によって食品が時々照射される食品産業、農業、害虫制御、および放射性炭素年代測定が炭素14を使用して炭素含有物の年代を測定する考古学において、商業的に使用される。放射性同位体は、非常に不安定で崩壊し易く、アルファ線、ベータ線、およびガンマ線の形態の放射線を放射する。放射性同位体のクラスは、典型的な原子力発電所の運転の副産物として生成される。

【0004】

Co-60、Ac-225、およびW-188などの商業的に価値のある放射性同位体の生成は、原子炉コア内に配置された標的材料による少なくとも1つの中性子の捕獲を必要とする。Co-60 (Co-60) は、例えば、放射線療法、機器の滅菌、および食品照射に使用され得る、高エネルギーガンマ線を生成する。Co-60は、原子炉で人工的に生成されるコバルトの合成放射性同位体である。意図的な工業的生成は、モノアイソトピックおよび単核種コバルト同位体Co-59のバルク試料の中性子活性化に依存する。Ac-225 (Ac-225) は、トリウム-229の崩壊によって生成される。Ac-225は、悪性腫瘍の治療のための核医学で使用され得る。タングステン-188 (W-188) は、熱および高エネルギー中性子による酸化タングステンの照射によって、原子炉で生成される。W-188は、核医学、腫瘍学、放射線学、および心臓学における様々な治療用途に有用性を示した、高エネルギーのβ放出放射性同位体である、Re-188 (Re-188) を生成するために使用される。

【0005】

所望の放射性同位体の生成速度は、標的材料（例えば、Co-59、トリウム-229など）を取り囲む中性子の数およびエネルギースペクトル、ならびに標的材料がエネルギー範囲内で中性子を捕獲する確率に依存する。この現象の例は、中性子エネルギーの関数として図1に示される、Co-59に対する中性子「捕獲断面」測定によって、明らかにされる。中性子捕獲断面は、0.025 eVで約50 barn (b) であるように示されている。中性子捕獲断面は、約107 eVの中性子エネルギーに存在する捕獲共鳴で劇的に増加し、それは、約7000 bまで増加する。U-235核分裂において、最も可能性の高い中性子エネルギーは、0.73 MeVである。理想的には、Co-60が生成される速度を最大化するために、104 eV以下の中性子の数が最大化されることを必要とする。これは、発生する核分裂の数を単純に増加させることによって行われ得る。これは、燃料中に存在するU-235の量を増加させることによって達成され得る。しかしながら、そのアプローチの経済的コストは、生産される放射性同位体のコストを顕著に増加させる。

【0006】

別の方法は、核分裂速度を増加させることを必要とせずに、標的材料を取り囲む107 eVの中性子の量を増加させることである。これは、標的材料を、高い中性子不活性を有する最適な量の中性子エネルギー減速材料で取り囲み、標的のエリアから拡散する前に、Co-59標的によって通常捕獲されないであろう、より高いエネルギーを有するより多くの中性子を減速させることによって達成され得る。これは、所望のエネルギー範囲内にある核分裂中性子の数を効果的に増加させて、標的材料における中性子捕獲を最大化する。Co-60標的を取り囲む水の量および分布を最適化することは、標的の周囲の平均中

中性子エネルギースペクトルが、 Co-60 産生速度を最大化するために制御されることを可能にすることになる。同じアプローチが、他の所望の放射性同位体の産生速度を増加させるために使用され得る。

【0007】

照射標的の周囲の核分裂中性子エネルギースペクトルの所望のシフトを達成する1つのやり方は、水などの中性子エネルギー減速材、または低中性子捕獲断面および高中性子散乱断面を有する他の材料の量を、標的と核分裂によって生成される中性子との間で変化させることである。水減速材の水素は、高エネルギーの中性子を減速させるのに非常に効果的であるが、照射標的材料と全く相互作用することができないため、それらを捕獲しない。照射標的を取り囲む水の量を調整することは、照射標的の幾何学的形状を制御することによって、水冷却および減速された原子炉コア内で達成され得る。小さい中性子捕獲断面を有する低原子数金属物質（例えば、ジルコニウム、ニッケル、グラファイト）などの水以外の材料もまた、標的材料中の中性子捕獲を増加させるために使用され得る。

10

【0008】

Co-60 の生成のための Co-59 のロッド形状スラグを含有する、シンプルフロープラグまたは熱硬化性吸収体ロッドと同様の加圧水型原子炉（PWR）燃料アセンブリインサートの使用が、商業的に価値のある量の Co-60 を生成するために使用され得ることが、当業者によって実施された計算によって示されている。しかしながら、所望の照射期間の終了時に照射された材料における Co-60 の現在の照射標的形状の Ci/cm^3 および単位長さ当たりの Ci における予測される比活性（SA）は、現在の適用実践に有用な経済的に有利な生成を支援するために必要とされるよりも少ない。

20

【発明の概要】

【0009】

以下の概要は、開示された実施形態に特有の革新的な特徴の一部の理解を容易にするために提供され、完全な説明であることを意図していない。実施形態の様々な態様の完全な理解は、明細書、特許請求の範囲、要約および図面の全てを、全体としてとらえることによって得ることができる。

【0010】

本明細書では、放射性同位体生成の経済性に利益をもたらすことを意図して、PWR 燃料アセンブリなどの従来の原子炉に存在するガイドシンプル内に収まるように設計された照射標的から最大量の所望の放射性同位体を生成するためのデバイスおよび方法が説明される。

30

【0011】

この目的のために使用される放射性同位体生成カプセルは、標的材料および中性子減速材のいずれか一方収容するための内側容器と、内側容器によって収容されない標的材料および中性子減速材のいずれか一方を収容するための、内側容器を取り囲む外側容器と、中性子減速材から標的材料を隔離するためのクラディングと、を含み得る。中性子減速材は、様々な態様では、水などの冷却剤であり得る。

【0012】

様々な態様では、内側容器は、クラディング材料の内壁によって画定されている。様々な態様では、外側容器は、クラディング材料の外壁とクラディング材料の内壁との間に画定されている。カプセルはまた、原子炉の燃料アセンブリの挿入コンポーネント内に隣接するカプセルを軸方向に接合するための係止部材を含み得る。係止部材は、様々な態様では、外側容器上に装着され得る。特定の態様では、係止部材は、クイックディスコネクト係止部材であり得る。

40

【0013】

カプセルはまた、内側容器を外側容器内の所望の位置に保持するための支持部材を含み得る。支持部材は、外側容器を形成するクラディング材料の外壁から、内側容器を画定するクラディング材料の内壁まで延在する支柱であり得る。支柱は、好ましくは、原子炉内の温度で膨張して、外側容器の外壁と内側容器の内壁との間の支柱に対して圧入を提

50

供する材料であって、原子炉内の温度より低い温度まで冷却されるときに収縮する、材料から作製されている。

【0014】

内側容器は、様々な態様では、円筒体であり、外側容器は、内側容器の軸と同心の環状円筒体である。特定の態様では、内側円筒体は、中性子減速材を保持し、環状円筒体は、照射のための標的材料を保持する。内側円筒体は、照射用の標的材料を保持し、環状円筒体は、中性子減速材を保持する。

【0015】

所望の放射性同位体を生成するための方法が本明細書に説明されている。方法は、少なくとも1つのカプセルを提供することであって、各カプセルは、内側容器と、内側容器を取り囲む外側容器と、内側容器を外側容器から隔離するクラディング材料と、を有する、提供することと、照射時に所望の放射性同位体を生成する標的材料を、内側容器または外側容器のいずれか一方に挿入することと、標的材料をクラディング材料で取り囲んで、カプセル内の標的材料を隔離することと、標的材料が挿入されていない残りの内側容器または外側容器のいずれか一方に中性子減速材を挿入することと、標的材料および中性子減速材が充填された内側容器および外側容器を有する少なくとも1つのカプセルを、核燃料アセンブリの挿入コンポーネントに挿入することと、標的材料から放射性同位体を形成するために標的材料を照射することと、挿入コンポーネントからカプセルを取り外すことと、を含む。

【0016】

本明細書に説明されるモジュール式放射性同位体生成カプセルは、中性子エネルギースペクトルが、モジュール外包に含まれる全活性を調整する能力を伴って、標的捕獲断面および最小原子炉燃料アセンブリ反応性低減のために最適化されることを可能にする。

【図面の簡単な説明】

【0017】

本開示の特徴および利点は、添付図面を参照することによってより理解することができる。

【0018】

【図1】中性子エネルギーの関数としてのC o - 5 9 の中性子捕獲断面のグラフ（BN L - 3 2 5）の画像である。

【図2 A】例示的なガイドシンプルのグループを示す（A）。

【図2 B】ガイドシンプルが燃料アセンブリ内に位置決めされたときのガイドシンプルの上面断面概略図を示す（B）。

【図2 C】（C）ガイドシンプルにおける挿入のためのシンプルプラグフィンガおよび放射性同位体生成カプセルの概略的例示を例示する。

【図3 A】外側環状標的材料配置を有する例示的なモジュール式放射性同位体生成カプセルの概略的な上面断面図である。

【図3 B】外側環状標的材料配置を有する例示的なモジュール式放射性同位体生成カプセルの概略的な側面断面図である。

【図4 A】中央に配置された標的材料を有する例示的なモジュール式放射性同位体生成カプセルの概略的な上面断面図である。

【図4 B】中央に配置された標的材料を有する例示的なモジュール式放射性同位体生成カプセルの概略的な側面断面図である。

【図5】図3のカプセルの減速材が充填されたコアに挿入されている、図4に示されるカプセルの標的材料の概略的例示である。

【発明を実施するための形態】

【0019】

本明細書で使用される場合、単数形の「a」、「an」、および「the」は、文脈が別途明確に指示しない限り、複数形の参照を含む。

【0020】

例えば、限定されないが、最上部、最下部、左、右、下方、上方、前、後、およびそれらの変形など、本明細書で使用される方向表現は、添付図面に示される要素の配向に関連し、別段の明示的な記載がない限り、特許請求の範囲を限定するものではない。

【0021】

特許請求の範囲を含む本出願では、別段の記載がない限り、量、値、または特性を表す全ての数字は、全ての場合において、用語「約」によって修正されていると理解されるべきである。したがって、数字は、用語「約」が数字と共に明示的に表示されていなくても、単語「約」が前に付いているかのように読み取ることができる。したがって、反対に示されない限り、以下の説明に記載される任意の数値パラメータは、本開示による組成物および方法で取得しようとする所望の特性に応じて変化し得る。少なくとも、均等論の適用を特許請求の範囲に限定する試みではなく、本説明に記載される各数値パラメータは、少なくとも、報告された有効桁数に照らして、かつ通常の丸め技法を適用することによって、解釈されるべきである。

【0022】

本明細書に列挙される任意の数値範囲は、その中に包含される全てのサブ範囲を含むことが意図される。例えば、「1～10」の範囲は、列挙された最小値1と、列挙された最大値10との間（ならびに最小値1および最大値10を含む）の全てのサブ範囲、すなわち、最小値が1以上、および最大値が10以下の全てのサブ範囲を含むことが意図されている。

【0023】

図2Aおよび図2Bを参照すると、核燃料アセンブリ46は、一般に、複数の燃料ロッド48（明確化のために、少数のロッドのみが外周の周囲に示されているが、使用時には、ロッドが燃料アセンブリ空間の大部分を占めることになる）、およびガイドシムブル管30のセットを含む。ガイドシムブル30は、制御ロッドまたは原子炉（図示せず）内で使用される炉内計装を保持するために提供された空の管である。示されるように、各ガイドシムブル30は、ネック38、中間区分32および先細端34を含む。いくつかのガイドシムブル30は、それ自体が燃料アセンブリ46の上部コアプレート42からの押さえばね44によって懸架される、プレート40から懸架される。図2Bに示される例示では、各燃料アセンブリ46には、25個のガイドシムブル30が存在する。数は、原子炉のサイズなどの因子に応じて変動し得る。

【0024】

図2Cは、ガイドシムブル30内に収まるように寸法決めされた例示的なシムブルプラグフィンガ26の断面図を例示する。プラグフィンガ26は、外側シース36、フィンガ26の開放端を閉じるためのキャップ28、および先細閉鎖端24を含む。プラグフィンガ26は、ガイドシムブル30の内部に収まるように意図されており、そのため、フィンガ26の外側寸法は、ガイドシムブル中間区分30の内径以下になる。中間区分32と先端34との間の接合部、または中間区分32およびネック部38のいずれかが、プラグフィンガ26の挿入のために開放され得る。

【0025】

例示的な放射性同位体生成カプセル100（図4参照）が、プラグフィンガ26内に位置決めされて示されている。原子炉の運転中に燃料アセンブリガイドシムブル30に挿入されたプラグフィンガ26が存在しない場合、ガイドシムブル管は、中性子減速材、および中性子減速材を超える流量を伴う、水などの、PWR内で使用される冷却剤で充填されることになり、冷却剤は、燃料アセンブリ46内に含まれる燃料ロッド48を通して流れる。プラグフィンガ26は、この流れを遮断し、結果として燃料ロッド48間の中性子減速材および冷却剤の流れを増加させる。プラグフィンガ26内に照射標的材料を含めることは、プラグフィンガ26が、それらの意図された機能を果たすこと、および所望の放射性同位体を生成することの両方を行うことを可能にする。

【0026】

当業者は、プラグフィンガ26および放射性同位体生成カプセル10、100の様々な

10

20

30

40

50

異なる幾何学的形状が使用され得ることを理解することになるが、従来の燃料アセンブリガイドシンプル 30 と同じ幾何学的形状を使用することは、燃料アセンブリの機械的設計にいかなる修正を行う必要性も回避する。このアプローチは、商業用軽水炉（LWR）設計において放射性同位体生成を実装することと関連付けられたコストを大幅に低減する。

【0027】

図 3 A および図 3 B は、プラグフィンガ 26 内の挿入のためのモジュール式放射性同位体カプセル 10 の例示的な実施形態を例示する。示される各カプセル 10 は、内側クラッディング 16 によって画定される内側円筒体 52 などの内側容器を含む。内側円筒体は、この実施形態では、中性子減速材 14、および様々な態様では、水である、冷却剤を収容する。内側円筒体 52 を取り囲むものは、内側クラッディング 16 と外側クラッディング 18 との間に画定される外側環状円筒体 54 などの外側容器である。様々な態様では、内側円筒体 52 は、その軸が外側環状円筒体 54 の軸と同心であるように位置決めされる。環状円筒体 54 は、この実施形態では、原子力発電サイクル中に照射される標的材料 12 を保持する。標的材料 12 は、生成される所望の放射性同位体に応じて変動することになり、所望の放射性同位体の生成のための適切な標的材料が選択され得る。標的材料 12 は、限定されるものではないが、固体ブロック、粉末、ペレット、球、または液体を含む、任意の好適な形態であり得る。中性子減速材および冷却剤を保持する、この実施形態の内側容器の上および下端は、開放端 22 によって、図 3 によって示されるように、プラグフィンガ内部に開放されている。標的材料を保持する外側容器の上および底端は、外側クラッディング 18 の上部および底部の延在部によって閉鎖されて、中性子減速材および冷却剤から標的材料を隔離する。様々な態様では、2 つ以上のモジュール式カプセル 10 は、プラグフィンガ 26 内に軸方向に積層され得、係止リングもしくはペグ 20 または隣接するカプセル 10 を接合するための同様の機構によって互いに接続され得る。

【0028】

図 4 A および図 4 B は、放射性同位体生成カプセル 100 の代替的な実施形態を例示する。カプセル 100 は、標的材料 120 を保持する内側円筒体 152 などの内側容器と、PWR 内の中性子減速材 140 および冷却剤を保持する外側環状円筒体 154 などの外側容器と、を含む。内側クラッディング 160 は、標的材料の上部、底部、および側部を取り囲み、内側円筒体を環状円筒体から分離する。外側クラッディング 180 は、環状円筒体の側部を取り囲む。照射された標的材料が固体である場合、クラッディングは、標的材料上に単純に堆積され得る。標的材料が粉末、ペレット、球、または液体である場合、クラッディングは、標的材料のための容器の壁を形成して、中性子減速材および冷却剤から標的材料を隔離する。

【0029】

支持部材 210 は、環状円筒体 154 内の定位置に内側円筒体 152 を支持する。支持部材は、環状円筒体 154 内の内側円筒体 152 を中心とする、および堅固に機械的に支持する、いずれかまたは両方に好適な任意のデバイスであり得る。例えば、支持部材 210 は、内側クラッディング 160 から半径方向外側に延在するか、または外側クラッディング 180 から半径方向内側に延在して、反対側のクラッディング表面上の係合表面と接続する、フィンガまたは支柱様構造であり得る。あるいは、支持部材 210 は、原子炉の典型的な温度下で熱膨張を受けて、圧入を生じさせるが、周囲の温度が低下すると、内部円筒体 152 が環状円筒体 154 から取り外されることを可能にするほど十分に収縮する材料で作製され得る。

【0030】

様々な態様では、2 つ以上のモジュール式カプセル 100 は、プラグフィンガ 26 内に軸方向に積層され得、係止リングもしくはペグ 200 または隣接するカプセル 100 を接合するための同様の機構によって互いに接続され得る。

【0031】

C o - 60 などの放射性同位体の生成のための本明細書に説明されるカプセル 10 または 100 の設計は、変換速度を最大化することによってガンマ放射線放射強度を最大化す

る。例えば、内側円筒体 5 2 または環状円筒体 1 5 4 内の水であり得る中性子減速材冷却剤は、プラグフィンガ 2 6 の上部および下部で、それぞれ、フィンガ 2 6 の外側シース 3 6 および先端 2 4 を貫通する小さな孔 5 0 を通して、プラグフィンガ 2 6 の外側シース 3 6 に出入りする。(図 2 C 参照) 上記に説明されるように、減速材および冷却剤を収容するカプセル 1 0 / 1 0 0 の部分は、キャップされず、そのため、この部分のカプセルの上部および底部は、PWR シンプルプラグフィンガ 2 6 の内側の液体減速材および冷却剤環境に開放されている。

【0032】

クラディング 1 6 および 1 8、ならびにクラディング 1 6 0 および 1 8 0 は、Co-60 などの標的材料 1 2 / 1 2 0 が、中性子減速材を保持する円筒体内に標的材料を保持している円筒体から浸出することを防止する材料から作製される。

10

【0033】

最も好適な材料は、標的材料および生成される所望の放射性同位体に依存することになる。Co-60 の例示的な材料は、Ni および Zr を含む。Ac-225 および W-188 の例示的な材料は、Zr およびステンレス鋼を含む。クラディングのための材料は、標的材料の照射に対する標的材料の耐食性、およびクラディング中に穿孔を引き起こす化学反応を回避する必要性などの因子に依存することになる。

【0034】

環状円筒体 5 4 / 1 5 4 の厚さと内側円筒体 5 2 / 1 5 2 の直径との比率は、所望の放射性同位体の生産速度を最大化するために必要な寸法を計算するために当業者によって理解される、炉心分析用の advanced nodal code (ANC (商標)) を利用するソフトウェアパッケージ、または mark PALADIN (登録商標) の下で販売される同様のパッケージなどの、市販の核設計ツールを使用して調整され得る。

20

【0035】

Dm として図 3 および図 4 に示される、カプセル 1 0 または 1 0 0 の外径の最大値は、図 2 C に示される、プラグフィンガ 2 6 の内径 (ID) に等しい。プラグフィンガ 2 6 の ID の例は、6.1 mm である。カプセル 1 0 / 1 0 0 に収容される照射標的材料 1 2 / 1 2 0 の長さは、寸法 Lt として図 3 および 4 に示される。この長さは、放射性同位体のエンドユーザの必要性によって決定される。例えば、特定の用途に必要とされる選択された放射性同位体の照射活性は、カプセル 1 0 / 1 0 0 内の標的材料の単位長さ毎に計算され得る。以下により詳細に説明される理由に関して、図 4 に示されるように、内側円筒体 1 5 2 の理想的な直径 (Ds)、または内側円筒体 1 5 2 内に保持される標的材料 1 2 0 は、図 3 に示されるように、内側円筒体 5 2 の直径 (Dc) 以下である。

30

【0036】

1 つ以上のカプセル 1 0 および 1 0 0 は、プラグフィンガ 2 6 の内部に縦列に装填され得る。図 3 および図 4 は、それぞれ、プラグフィンガ 2 6 の内部空洞内で、互いに離間され得るか、または互いに積層され得る、例示的なモジュール式カプセル 1 0 および 1 0 0 を示す。様々な態様では、係止リング 2 0 または 2 0 0 などの、隣接するカプセルモジュール 1 0 または隣接するカプセルモジュール 1 0 0 を一緒に機械的に接合するための手段が、任意選択的に、例えば、プラグフィンガの外側シースの故障を引き起こすモジュールの機械的振動の潜在性を最小化するために提供され得る。接続方法のタイプの例は、1 / 4 回転のクイック接続解除設計の使用である。クイック接続解除設計の多数の例は、当技術分野で公知である。モジュール 1 0 または 1 0 0 は、全長および全活性がエンドユーザの必要性を満たすまで接合され得る。

40

【0037】

接続されたか、または積層されたモジュールは、互いに離間され、かつフィンガ 2 6 内で分離されて、照射後に回収されるモジュールカプセル 1 0 または 1 0 0 が、照射された材料を生成原子炉から最終処理施設まで輸送するために使用される運送容器の内側に適切に収まることを可能にし得る。カプセルを側部から保持し、外側容器リム上または接合機構 2 0 / 2 0 0 (例えば、リム上のクイック接続解除部材) 上に装着して、プラグフィン

50

ガ２６内で隣接するモジュールを軸方向に分離する支持部材２１０、または当業者に既知の同様の機械的アタッチメントなどの、任意の好適な手段が、モジュール式カプセルを互いに分離するために使用され得る。アタッチメントまたは懸架支持体の好適な設計は、カプセル１０／１００および標的材料１２／１２０が、低温で容易に引き出されることを可能にして、照射された材料処理施設におけるカプセル１０／１００からの標的材料の取り外しを容易にすることになる。

【００３８】

実際には、１つ以上のカプセル１０のモジュールは、複数のプラグフィンガ２６の各々に配置されることになる。１つ以上のカプセル１０が装填された各単一のプラグフィンガ２６は、ガイドシンプル３０の中間区分３２に挿入されることになる。図２Ｂに示されるように、ガイドシンプルのアレイ内の個々のガイドシンプル３０の各々は、それ自体が１つ以上のカプセル１０を装填されているプラグフィンガ２６を受容し得る。様々な態様では、ガイドシンプルのアレイ内のガイドシンプル３０のうちの１つまたは少数のみが、プラグフィンガ２６およびカプセル１０を収容するために使用される必要がある。したがって、多数のカプセル１０は、複数のプラグフィンガ２６を介して、１つまたは複数のガイドシンプル３０に挿入され、原子炉内の放射線に曝露されて、所望の放射性同位体を生成し得る。

【００３９】

あるいは、１つ以上のカプセル１００のモジュールは、複数のプラグフィンガ２６の各々に配置されることになる。１つ以上のカプセル１００が装填された各単一のプラグフィンガ２６は、ガイドシンプル３０の中間区分３２に挿入されることになる。図２Ｂに示されるように、ガイドシンプルのアレイ内の個々のガイドシンプル３０の各々は、それ自体が１つ以上のカプセル１００を装填されているプラグフィンガ２６を受容し得る。様々な態様では、ガイドシンプルのアレイ内のガイドシンプル３０のうちの１つまたは少数のみが、プラグフィンガ２６およびカプセル１００を収容するために使用される必要がある。したがって、多数のカプセル１００は、複数のプラグフィンガ２６を介して、１つまたは複数のガイドシンプル３０に挿入され、原子炉内の放射線に曝露されて、所望の放射性同位体を生成し得る。

【００４０】

第３の代替的アプローチでは、１つ以上のカプセル１０のモジュールは、１つ以上の単一のプラグフィンガ２６内に配置され、１つ以上のカプセル１００のモジュールは、１つ以上の異なる単一のプラグフィンガ２６内に配置される。１つ以上のカプセル１０が装填されたプラグフィンガ２６、および１つ以上のカプセル１００が装填されたプラグフィンガ２６は、異なるガイドシンプル３０の中間区分３２に挿入されることになる。図２Ｂに示されるように、ガイドシンプルのアレイ内の個々のガイドシンプル３０の各々は、それ自体が１つ以上のカプセル１０または１つ以上のカプセル１００を装填されているプラグフィンガ２６を受容し得る。様々な態様では、ガイドシンプルのアレイ内のガイドシンプル３０のうちの１つまたは少数のみが、カプセル１０または１００と共にプラグフィンガ２６を収容するために使用される必要がある。

【００４１】

照射後、カプセル１０／１００およびプラグフィンガ２６は、ガイドシンプル３０から取り外されなければならない。ガイドシンプルは、既知の手段によって燃料アセンブリ４６から引き出されることになる。引き出されたガイドシンプル３０の中間区分３４は、例えば、先端３４およびネック部３８のいずれかまたは両方を取り外すことによって、開放され得る。プラグフィンガまたはフィンガ２６は、ガイドシンプル３０から取り外されることになり、カプセル１０および１００は、プラグフィンガ２６から取り外され、放射性同位体生成施設に輸送される。一態様では、カプセル１０／１００は、フィンガ２６を輸送容器に収まる適切な長さに切断することによって、プラグフィンガ２６から回収され得る。生成施設に到着すると、照射された標的材料は、カプセルから取り外されることになり、所望の放射性同位体は、既知の技術によって、照射された材料から分離されることに

10

20

30

40

50

なる。

【0042】

図5は、図3に示されるモジュール内に收容される活性を増加させるために使用され得る例示的な方法を例示する。方法は、図3および図4に示されるようなモジュールを、同じ原子炉または異なる炉心内で照射する（例えば、同時にまたは順次に）ことを伴う。一旦、所望の放射性同位体のレベルが所望の活性レベルに到達し、処理施設に運送されると、リンクされたカプセル10または100のモジュールは、個々のモジュールを生成するために連結解除され得る。円筒体152の内容物、例えば、図4に示されるモジュール内に收容されるカプセル100の内容物は、モジュールの中心から押し出されて、図3に示されるカプセル10のモジュールの円筒体52内に入る。この手順における内側円筒体152の直径は、内側円筒体52の直径よりも小さいことになる。円筒体52内に受容される材料は、円筒体52の底部の周囲のリムおよび係止リング20によって、円筒体52の底部を完全に通過することを防止されることになる。これは、環状円筒体54の照射カプセル10のモジュールの単位長さ当たりの正味活性および活性を、カプセル10および100の両方の活性の本質的に総和まで増加させることになる。このアプローチは、エンドユーザの所望の放射線量分布を最大化するために必要とされ得る、ユーザ定義された軸方向源強度分布を有する管状照射源を構築するために使用され得る。

10

【0043】

カプセル10および100は、内側円筒体および環状外側円筒体を有すると説明されているが、他の形状が使用されてもよい。所望の放射性同位体を生成するために原子炉からの放射線が標的材料によって吸収され得るように、核燃料アセンブリのための挿入構成要素に挿入され得るカプセル内に両方收容される、円筒体は、既存の燃料アセンブリ挿入構成要素に最良に収まるが、中性子減速材の容器に隣接する（例えば、容器によって取り囲まれるか、またはその中に位置決めされるかのいずれか）照射のための標的材料を收容する容器の説明された概念は、円筒体に限定されず、原子炉構成要素の幾何学的形状に応じて変動し得る。

20

【0044】

モジュール式カプセル10／100の設計および関連方法は、燃料アセンブリ出力分布における最小限の中断、および最小限の有害な燃料アセンブリの濃縮の影響を伴う、最大量の所望の放射線同位体生成を可能にする。本明細書に説明される方法およびカプセル設計は、所望の放射性同位体が、既存のガイドシムブル挿入設計を使用して、既存の燃料アセンブリ内で生成されることを可能にする。

30

【0045】

本明細書に説明されるモジュール式放射性同位体生成カプセル10／100は、中性子エネルギースペクトルが、モジュール外包に含まれる全活性を調整する能力を伴って、標的捕獲断面および最小原子炉燃料アセンブリ反応性低減のために最適化されることを可能にする。

【0046】

モジュール式カプセル10／100は、ガイドシムブル30に挿入されていると説明されているが、それらは、追加的に、または代替的に、湿式環状燃焼可能吸収体アセンブリなどの、他の既存の燃料アセンブリ挿入体に設置されてもよい。モジュール式カプセルの10／100設計は、放射性同位体製品サプライヤに、照射源活性レベルおよび照射源アセンブリ内の活性レベルの分布に関して、製品の柔軟性の顕著な増加を提供する。

40

【0047】

本明細書に説明される主題の様々な態様が、以下の実施例に記載される。

【0048】

実施例1－放射性同位体生成カプセルであって、標的材料および中性子減速材のいずれか一方を收容するための内側容器と、内側容器によって收容されない標的材料および中性子減速材のいずれか一方を收容するための、内側容器を取り囲む外側容器と、中性子減速材から標的材料を隔離するためのクラディングと、を備える、放射性同位体生成カプセ

50

ル。

【0049】

実施例2－内側容器は、クラディング材料の内壁によって画定されている、実施例1に記載のカプセル。

【0050】

実施例3－外側容器は、クラディング材料の外壁と前記クラディング材料の前記内壁との間に画定されている、実施例1または2に記載のカプセル。

【0051】

実施例4－隣接するカプセルを軸方向に接合するための係止部材をさらに備える、実施例1～3のいずれかに記載のカプセル。

【0052】

実施例5－係止部材は、外側容器上に装着されている、実施例4に記載のカプセル。

【0053】

実施例6－係止部材は、クイックディスコネクト係止部材である、実施例4または5に記載のカプセル。

【0054】

実施例7－内側容器を外側容器内の所望の位置に保持するための支持部材をさらに備える、実施例1～6のいずれかに記載のカプセル。

【0055】

実施例8－支持部材は、外側容器を形成するクラディング材料の外壁から、内側容器を画定するクラディング材料の内壁まで延在する支柱である、実施例7に記載のカプセル。

【0056】

実施例9－支柱は、原子炉内の温度で膨張して、外側容器の外壁と内側容器の内壁との間の支柱に対して圧入を提供する材料であって、原子炉内の温度より低い温度まで冷却されるときに収縮する、材料から作製されている、実施例7または8に記載のカプセル。

【0057】

実施例10－内側容器の所望の位置は、外側容器内で軸方向に中心に位置する、実施例7～9のいずれかに記載のカプセル。

【0058】

実施例11－内側容器は円筒体であり、外側容器は内側容器の軸と同心の環状円筒体である、実施例1～10のいずれかに記載のカプセル。

【0059】

実施例12－内側円筒体は中性子減速材を保持し、環状円筒体は照射のための標的材料を保持する、実施例11に記載のカプセル。

【0060】

実施例13－内側円筒体は照射用の標的材料を保持し、環状円筒体は中性子減速材を保持する、実施例11に記載のカプセル。

【0061】

実施例14－所望の放射性同位体を生成するための方法であって、少なくとも1つのカプセルを提供することであって、各カプセルは、内側容器と、内側容器を取り囲む外側容器と、内側容器を外側容器から隔離するクラディング材料と、を有する、提供することと、照射時に所望の放射性同位体を生成する標的材料を、内側容器または外側容器のいずれか一方に挿入することと、標的材料をクラディング材料で取り囲んで、カプセル内の標的材料を隔離することと、標的材料が挿入されていない残りの内側容器または外側容器のいずれか一方に中性子減速材を挿入することと、標的材料および中性子減速材が充填された内側容器および外側容器を有する少なくとも1つのカプセルを、核燃料アセンブリの挿入コンポーネントに挿入することと、標的材料に対して放射性同位体を形成するために標的材料を照射することと、挿入コンポーネントからカプセルを取り外すことと、を含む、方法。

10

20

30

40

50

【0062】

実施例15－照射された標的材料をカプセルから取り外すことと、所望の放射性同位体を照射された材料から分離することと、をさらに含む、実施例14に記載の方法。

【0063】

本明細書で言及した全ての特許、特許出願、刊行物、またはその他の開示資料は、個々の参考文献がそれぞれ参照により明示的に組み込まれるように、その文献全体が参照により本明細書に組み込まれる。参照により本明細書に組み込まれると言及された全ての文献、および任意の資料、またはそれらの一部は、組み込まれた資料が、本開示に記載された既存の定義、記述、またはその他の開示材料と矛盾しない限り、本明細書に組み込まれる。したがって、本明細書に記載の開示は、必要な範囲において、参照により本明細書に組み込まれた任意の矛盾する資料に優先し、本出願に明示的に記載される開示が優先する。

10

【0064】

本発明は、様々な例示的なおよび実例的な実施形態を参照して説明されてきた。本明細書に記載の実施形態は、開示された発明の様々な実施形態の様々な詳細の実例的な特徴を提供するものとして理解される。したがって、特段の指示がない限り、可能な範囲において、開示した実施形態の1つまたは複数の特徴、要素、コンポーネント、成分、材料、構造物、モジュールおよび／または態様は、開示された本発明の範囲から逸脱することなく、開示された実施形態の1つまたは複数の他の特徴、要素、コンポーネント、成分、材料、構造物、モジュールおよび／または態様に対して、組み合わせられ、分離され、交換されおよび／または再配置され得ることが理解されるべきである。したがって、当業者であれば、本発明の範囲から逸脱することなく、例示的な実施形態のいずれにおいても様々な置換、改変、または組み合わせが可能であることを認識するであろう。さらに、当業者は、本明細書を検討すれば、本明細書に記載された本発明の様々な実施形態に対する多くの等価物を認識するか、または単に日常的な実験を使用して確認することができる。したがって、本発明は、様々な実施形態の説明によってではなく、特許請求の範囲によって限定される。

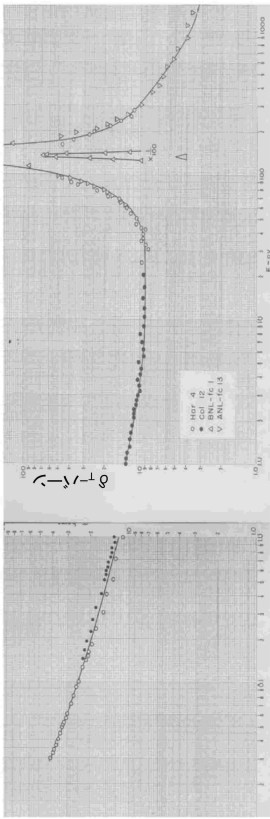
20

30

40

50

【図面】
【図 1】



【図 2 A】

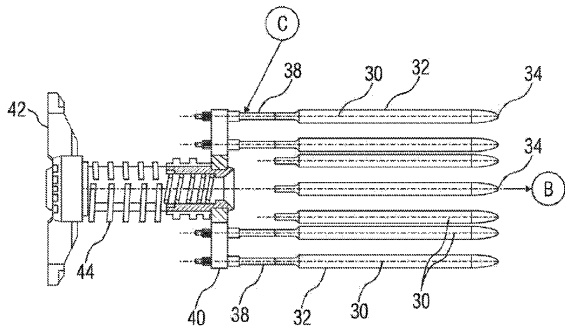


FIG. 2A

【図 2 B】

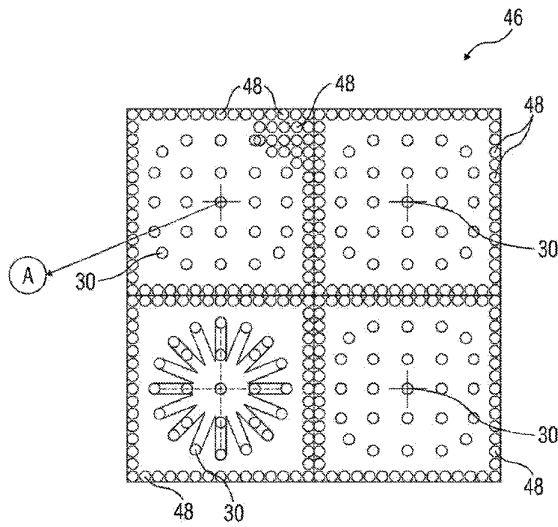
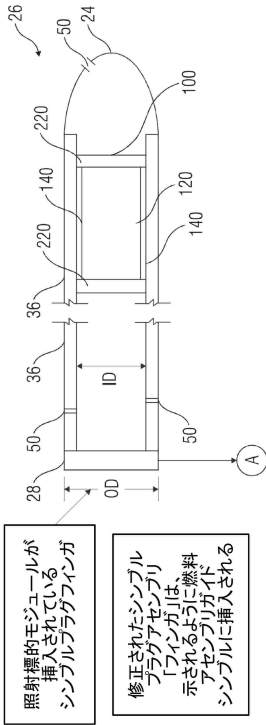


FIG. 2B

【図 2 C】



照射線のモジュールが
挿入されている
シンプルブラッグフィンガ

修正されたシンプル
ブラッグアセンブリ
「フィンガ」は、
示されるように燃料
アセンブリガイド
シンプルに挿入される

10

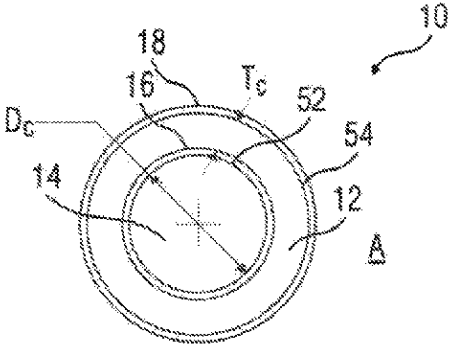
20

30

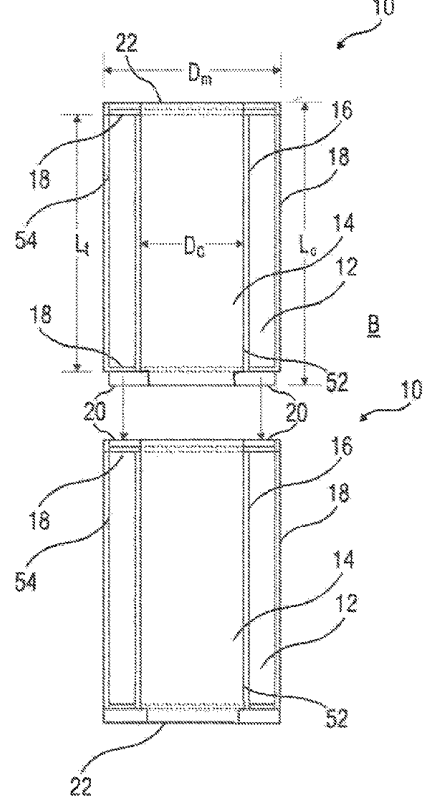
40

50

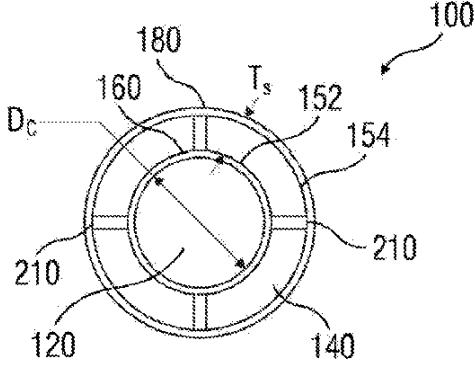
【図 3 A】



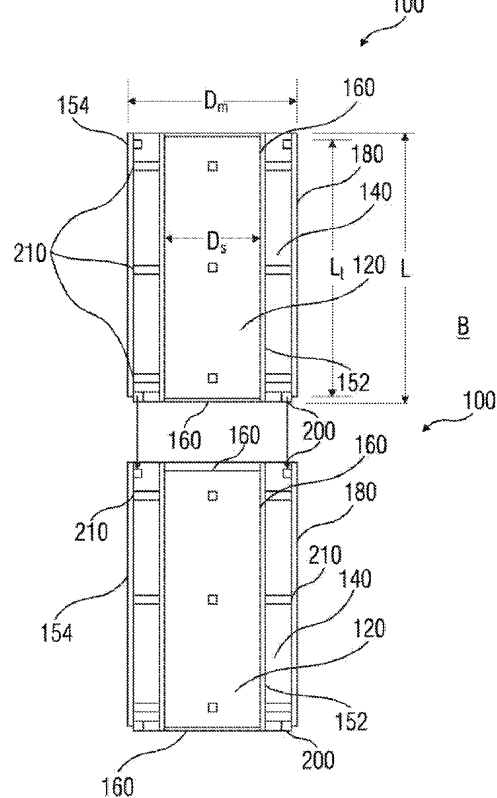
【図 3 B】



【図 4 A】



【図 4 B】



10

20

30

40

50

【図 5】

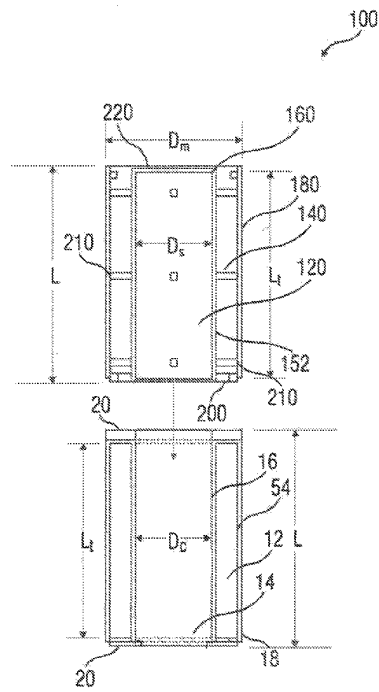


FIG. 5

フロントページの続き

(74)代理人 110000110

弁理士法人 快友国際特許事務所

(72)発明者 マイケル ディ． ハイベル

アメリカ合衆国 8 0 0 2 1 コロラド，ブルームフィールド，スタンドストーン サークル 1 3
0 8 8

審査官 藤田 健

(56)参考文献 特開平 0 3 - 0 2 9 8 9 9 (J P , A)

米国特許出願公開第 2 0 1 2 / 0 0 2 7 1 5 2 (U S , A 1)

特開 2 0 0 9 - 1 3 3 8 5 4 (J P , A)

特表 2 0 1 3 - 5 4 3 5 9 0 (J P , A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)

G 2 1 G 1 / 0 0

G 2 1 K 5 / 0 8

G 2 1 C 2 3 / 0 0