(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)特許出願公表番号
特表2012-529051
(P2012-529051A)
(43)公表日　平成24年11月15日(2012.11.15)

(51)Int.Cl.			F I			テーマコード（参考）
G21C	***3/60***	***(2006.01)***	G21C	3/60		
G21C	***3/62***	***(2006.01)***	G21C	3/62	A	

審査請求 未請求　予備審査請求 未請求　（全 21 頁）

(21)出願番号　特願2012-513969 (P2012-513969)
(86)(22)出願日　平成22年5月19日 (2010.5.19)
(85)翻訳文提出日　平成24年1月24日 (2012.1.24)
(86)国際出願番号　PCT/US2010/035412
(87)国際公開番号　WO2010/141218
(87)国際公開日　平成22年12月9日 (2010.12.9)
(31)優先権主張番号　61/182,954
(32)優先日　平成21年6月1日 (2009.6.1)
(33)優先権主張国　米国 (US)

(71)出願人　511292208
アドバンスト・リアクター・コンセプツ・エルエルシー
アメリカ合衆国バージニア州２０１９０，レストン，プラザ・アメリカ・ドライブ　１１７１０，スウィート　２０００
(74)代理人　100140109
弁理士　小野　新次郎
(74)代理人　100075270
弁理士　小林　泰
(74)代理人　100080137
弁理士　千葉　昭男
(74)代理人　100096013
弁理士　富田　博行

最終頁に続く

(54)【発明の名称】発電で使用される微粒子状金属燃料、リサイクルシステム、及び小型モジュール式反応炉

(57)【要約】
金属微粒子燃料システムが記載されている。金属燃料システムは、核反応炉で使用するための微粒子状金属燃料を含むものである。微粒子状金属燃料は、少なくとも１つの濃縮合金の複数粒子を含んでおり、それらは燃料カラムへ締固められている。金属粒子燃料システムは、更に、クラッディング及び／又はガス充填プレナムを含むものである。
【選択図】図１

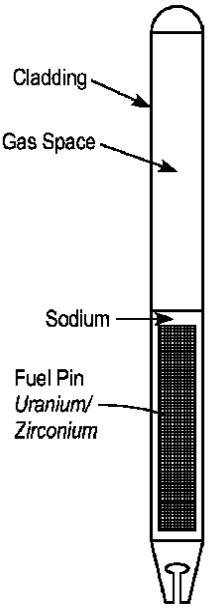


FIG. 1

【特許請求の範囲】
【請求項１】
少なくとも１つの濃縮合金の粒子を備えている、核反応炉内で使用するための微粒子状金属燃料と、
クラッディングと、
ガス充填プレナムと、を備えている金属燃料システムにおいて、
前記粒子は燃料カラムへ締固められている、金属燃料システム。
【請求項２】
前記締固めは、加振又は突固めによって得られている、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項３】
前記少なくとも１つの濃縮合金は、ウラン、プルトニウム、超ウラン、及びそれらの組合せから成る群より選択されている、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項４】
前記微粒子状金属燃料は、マイナーアクチニドを更に備えている、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項５】
前記クラッディングの中のガス状熱伝達媒体を更に備えている、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項６】
前記ガス状熱伝達媒体はヘリウムガスである、請求項５に記載の金属燃料システム。
【請求項７】
前記燃料カラムのスメア密度は大凡７５％又はそれ以下である、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項８】
粒子状金属燃料対プレナムの体積比は大凡０．８対大凡２．０である、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項９】
前記燃料カラムへの加圧を維持するための拘束具を更に備えている、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項１０】
前記粒子は、直径が約５０ミクロンから約１０００ミクロンの間にある、請求項１に記載の金属燃料システム。
【請求項１１】
反応炉タンクと、
前記反応炉タンク内の炉心であって、不活性ガスを熱伝達媒体として使用する、詰められた微粒子状金属燃料の燃料カラムを備えている炉心と、
液体ナトリウムを熱交換器を通して循環させるためのポンプと、を備えている小型モジュール式反応炉。
【請求項１２】
熱を超臨界二酸化炭素に伝達するための第２の熱交換器を更に備えている、請求項１１に記載の小型モジュール式反応炉。
【請求項１３】
ブレイトン二酸化炭素サイクルシステムを更に備えている、請求項１１に記載の小型モジュール式反応炉。
【請求項１４】
前記不活性ガスはヘリウムである、請求項１１に記載の小型モジュール式反応炉。
【請求項１５】
金属燃料をリサイクル又は再加工するための方法において、
パーセント燃焼度を有する燃料カラムを提供する工程と、

核分裂生成物廃棄物を高温冶金法的リサイクルを用いて抽出する工程と、
前記パーセント燃焼度に大凡等しい置換物質を或る一定の割合で添加する工程と、
金属燃料合金粉末を作成する工程と、
前記金属燃料合金粉末を置換用の炉心へ加振締固めする工程と、を備えている方法。
【請求項１６】
前記置換物質は劣化ウラン装填物である、請求項１５に記載の方法。
【請求項１７】
前記置換物質は軽水炉使用済核燃料である、請求項１５に記載の方法。
【請求項１８】
前記置換物質はサーメットである、請求項１５に記載の方法。
【請求項１９】
前記一定の割合の置換物質を添加する工程に先立ち、前記サーメットを金属状態へ還元する工程を更に備えている、請求項１８に記載の方法。
【請求項２０】
前記酸化物含有量は、前記置換炉心の大凡１０重量％から大凡２５重量％へ増加されてもよい、請求項１５に記載の方法。
【請求項２１】
前記金属燃料合金粉末は、直径が約５０ミクロンから約１０００ミクロンの粒子を備えている、請求項１５に記載の方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
（関連出願の相互参照）
[0001]本出願は、２００９年６月１日出願の米国仮特許出願第６１／１８２，９５４号の恩典を主張し、同出願の内容を参考文献としてここにそっくりそのまま援用する。
【０００２】
[0002]本発明は、核燃料、反応炉、及び発電所に関し、より厳密には微粒子状金属燃料に関する。
【背景技術】
【０００３】
電気需要
[0003]世界の電気需要は、２０３０年までには２倍に、また２０５０年までには４倍になると予想される。世界の電気需要の増加は、先進国から、そしてなおそれより大きな規模で開発途上国から、起こるものと予見されている。この急激な需要の伸びを賄うのに、原子力は現実的で費用効率のよいエネルギー源であろう。
【０００４】
[0004]天然ガスを動力源とする発電による寄与といった様な他の源からエネルギー供給を増やすことは、高くて安定しないガス価格、温室ガスの排出、及び不安定な供給源への長期依存に対する懸念によって制約されるであろう。一方、代替エネルギー（太陽光、風力、バイオマス、水力発電など）の形態は、増加する需要の一部を満たすには有用であるかもしれない。とはいえ、それらは、十分な規模ではないし、殆どの市場では新たな電気需要のかなりの部分を賄えるだけの十分な追加の発電容量を提供することができない。
【０００５】
[0005]従来の原子力発電所も追加の需要の一部を賄うことになろう。しかしながら、従来の原子力発電所には、乗り越えるべき深刻な障害がある。これらの障害には、金融資本コストが３０億ドルから６０億ドル超の範囲に及ぶこと、燃料廃棄物処分についての不確実性、及び大型ベースロード発電所に対応するには送電網容量が足りないことが含まれる。
【０００６】
[0006]石炭発電所も幾分かの追加供給を提供するであろうが、石炭の燃焼質量の量が、

それの環境へ及ぼす悪影響を考えると、深刻な政治的障害となる。

[0007]新しい燃料を使用して将来のエネルギー需要を賄うために、配給可能な電力のためのモジュール式で輸送可能な内蔵型反応炉が必要とされている。その様な反応炉であれば、消費者の近辺に設置することができ、電気配給網に対する大がかりで高価な増設の必要性が劇的に低減される。長期内蔵型のクリーンな動力源には、世界中の市場に広範な用途があろう。

【０００７】

従来の金属燃料

[0008]金属燃料は、核反応炉で使用された最初の燃料である。その後、セラミックが普及し出したが、これは、初期の金属燃料には炉心内での延命化を図る余地がなかったためである。また、高温での燃料とクラッディングの過剰な相互作用も懸念事項であった。

【０００８】

[0009]初期の金属燃料の欠陥は、金属燃料合金が過剰な燃料クラッディング相互作用を生じさせない非常に高い反応炉曝露を可能にする構成によって解決が図られた（図１参照）。図２は、照射された金属燃料要素の断面を示している。図１の使用されている金属燃料の型式は、当該金属燃料の高い熱伝導率のおかげで、セラミック燃料に勝る安全上の有意な利点を有している。１００，０００を超す金属燃料要素が実験用増殖炉（Experimental Breeder Reactor）（「ＥＢＲ-II」）の中でドライバ燃料として利用され、またそれら金属燃料要素は高速線束試験施設（Fast Flux Test Facility）（ＦＦＴＦ）で試験されてきた。これらの金属燃料の加工と性能を、本発明の金属燃料との比較ができるように簡単に説明する。

【０００９】

[0010]国内及び海外の新しい高速炉概念の幾つかで選択されている従来の金属燃料は、濃縮ウラン合金の鋳造固体ピンであって、それが低スウェリング性クラッディング内部でナトリウム結合される。ナトリウム結合は、従来の金属燃料とクラッディングの間の適切な大きさのギャップを満たし、照射の早い段階での熱伝達を促す。約１．５％の燃焼度の後、従来の金属燃料自体は概ね膨らんでクラッディングの内径に接触し、優れた熱伝達経路を実現することができる。相互に接続した空孔は、ガスプレナムへの経路を提供することができ、そのおかげでそれ以上半径方向へ膨らむことが未然に防止される。従来の金属燃料については、ＥＢＲ－IIで照射され、ノーマルとオフノーマルの両方の条件で試験された１００，０００を超える金属燃料要素を揃えた包括的性能データベースが存在している。

【００１０】

[0011]旧式のＥＢＲ－II及びＦＦＴＦ金属燃料の、クラッディング内部の燃料ピンは、ウラン‐モリブデン、ウラン‐ジルコニウム、又はウラン‐プルトニウム‐ジルコニウム、の合金である。燃料ピンは、ＹＶＣＯＲガラス金型の中へ射出式に鋳込まれる。燃料ピンの加工には、再処理燃料を加工するための遠隔作業で使用する場合に有用であることから射出鋳造が選択された。合金の溶融点は、ＶＹＣＯＲの軟化点より低くなくてはならず、そうすると、可能な合金の範囲が制限されてしまうことになる。

【００１１】

[0012]燃料ピンを金型から外して取り出したとき、燃料の一部がガラス金型に貼り付き、するとそれは廃棄物として取り扱われるか又はガラスを処理して燃料中のウランを回収しなくてはならないかどちらかを余儀なくされる。燃料ピンは、次いで、ナトリウムを収容しているクラッディング管の中へ装荷される。クラッディング管が燃料ピンと一体に、ナトリウムが溶けるように加熱される。すると、ナトリウムが燃料ピンとクラッディングの間のギャップを満たし、熱伝達経路を提供する。燃料要素は、燃料ピンとクラッディングの間の如何なるボイドをも取り除くために、加振されるか又は突固められる。燃料要素は、次に、ボイドが全て取り除かれたことを保証するため、渦電流又は超音波による技法を用いて検査される。

【００１２】

[0013]燃料要素にエンドキャップが溶接され、最終検査が施行される。要素は、次いで、反応炉への設置に向けて六角形の鋼ダクトに入れられる。要素を収容した六角形の鋼ダクトを反応炉の液体ナトリウム冷却材の中へ入れることができる状態になる前に、それらは複雑な燃料装荷機械の中で最上部から下に向けて加熱されなくてはならない。加熱及び溶解が指向性である理由は、ダクトを反応炉プールの中へ直接入れたなら、燃料要素のナトリウムがまず底から上に向かって液化するはずであり、固体ナトリウムが液体ナトリウムの軸方向への適切な熱膨張を阻害することになるからである。液体ナトリウムの半径方向膨張はクラッディングを変形させかねない。

【００１３】

[0014]照射の初期段階では、燃料ピン内部の核分裂ガスの生成が燃料ピンをクラッディングの内面に向けて膨らませる。ギャップに在ったナトリウムはガスプレナムの中へ動かされ、その結果、放出された核分裂ガスが利用できるプレナムの容積が減少する。燃料ピンとクラッディングの間のギャップは、燃料ピンがクラッディングに到達したちょうどそのときに、燃料中の核分裂ガスから形成される気孔同士が相互接続するように設計されている。核分裂ガスは、次いで、プレナムの中へ放出される。従って、クラッディングに掛かる応力は、燃料がクラッディングに圧力を加えるよりむしろ空いている空孔の中へ流れ戻ろうとするために大幅に減る。この設計の特徴は、金属燃料要素が高い反応炉内曝露を実現できるようにするものである。一旦、核分裂ガスがプレナムへ放出されてしまえば、スウェリングを生じさせる起動力は大幅に減る。クラッディング接触前に核分裂ガスを放出させるための最終燃料密度は７５％又はそれ以下である。

【００１４】

[0015]従来の金属燃料は、ナトリウム結合型金属燃料の射出鋳造によって作製されている。これらの鋳造では、金型、例えばＹＶＣＯＲ金型の軟化のせいで、射出鋳造燃料で使用できる合金組成の範囲が大幅に制限されてしまう。また、従来の金属燃料鋳造プロセスは、アメリシウムの様な揮発性含成分の損失を被ることもある。従来の金属燃料の核分裂性物質は、金型、例えばＹＶＣＯＲ金型にこびり付く傾向がある。更に、従来の金属燃料処理は、結合ボイドを取り除くための作業及びボイドについての非破壊的検査を要する。

【００１５】

遺物及び将来の使用済燃料

[0016]核エネルギーについての懸念分野に、軽水炉（light water reactor）（「ＬＷＲ」）使用済核燃料（spent nuclear fuel）（「ＳＮＦ」）の処分がある。ＬＷＲ　ＳＮＦを直接処分するやり方は、幾千年にも亘る隔離を要する。代わりに、ＬＷＲ　ＳＮＦを湿式再処理して、高速炉の核分裂に消費される寿命の長い放射性元素を除去することは可能ではあるが、費用が高くつく。小さい割合ながらもＬＷＲ　ＳＮＦの一部は、長期処分要件に影響力の大きい、寿命の長いアクチニド（例えば、プルトニウム、ネプツニウム、及びアメリシウム）から形成されている。加えて、アクチニドは、懸念される団体がそれらを回収して核兵器に使用しようとするかもしれないという潜在的な拡散の危険性を象徴するものであるともいえる。従って、ＬＷＲ　ＳＮＦの取り扱い及び処分のためのより簡単で直接的な方法が必要とされている。

【００１６】

[0017]核エネルギーのもう１つの関心分野は、ＬＷＲ　ＳＮＦ中になお含有されているエネルギーを上述のアクチニドの存在を通して回収することである。アクチニドのうち、アメリシウムは、保管場所環境における（熱生成及びＮｐ２３７への崩壊から生じる）長期有害性をもたらす最もたるものであり、その高い揮発性は新しい燃料ホストへの再処理と再パッケージ化を困難にするため、重要な課題となっている。従って、確実に、アメリシウムを、使用のため及びエネルギー回収のために回収できる手段と方法が必要とされている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【００１７】

【特許文献１】米国仮特許出願第６１／１８２，９５４号
【発明の概要】
【００１８】
[0018]本発明の一部の特定の実施形態は、燃料コストを１５年又はそれ以上に亘って固定化する長寿命の燃料カートリッジ炉心を提供するものである。他の実施形態は、燃料コストを１５年又はそれ以上の年数を含め多年に亘って固定化し且つオンサイト燃料補給の必要性を排除する長寿命の燃料カートリッジ炉心を含んでいる小型モジュール式反応炉（Small Modular Reactor）（「ＳＭＲ」）を提供するものである。
【００１９】
[0019]本発明の一部の特定の実施形態は、本発明の合金燃料を使用する液体金属冷却型高速中性子スペクトル炉の大規模利用について、その魅力及び実行可能性を高めることができる。本発明の一部の特定の実施形態は、合金燃料を使用する液体金属冷却型高速中性子スペクトル炉を提供するものである。反応炉の実施形態は、運搬可能且つ置換式とすることができる。一部の特定の実施形態では、金属燃料は、合金の微粒子を含んでいる。別の実施形態は、自らの燃料を増殖させることのできる合金燃料を提供するものである。更に別の目的は、ＬＷＲ使用済燃料を脱被覆及び／又は破砕することによって得られるＬＷＲ燃料由来の破砕微粒子を利用することのできる金属燃料を提供することである。別の実施形態は、１つ又はそれ以上のマイナーアクチニドを有する金属燃料を提供するものである。本発明の更に別の実施形態は、ＬＷＲの遺物及び将来の使用済燃料の問題に挑もうとするものであり、同時に、開示されている反応炉に、ＬＷＲ使用済燃料中のウラン、プルトニウム、及びマイナーアクチニドからエネルギーを生成させるものである。
【００２０】
[0020]一部の特定の実施形態では、金属燃料形態は、工場生産用に提供されている。本発明の別の実施形態は、金属燃料のための単純化された低温加工方法を提供するものであり、それにより、セラミックを含め、金型での射出鋳造は必要なくなる。本発明によって提供されている別の実施形態は、金属燃料又はそのカセットを、反応炉プールへの挿入に先立って上から下へ加熱することを必要としない金属燃料である。
【００２１】
[0021]本発明の別の実施形態は、ＬＷＲ　ＳＮＦ及び／又は他の酸化物燃料の形態をより単純に、例えば湿式再処理を展開する必要なしに、高速炉閉燃料サイクルの中へ導入することのできる共生燃料サイクルプロセスを提供するものである。別の実施形態では、核分裂性及び増殖性の元素を含有した如何なるセラミック物質についても、それらのためのホストマトリクスを提供することができる。
【００２２】
[0022]本発明の更なる特徴、利点、及び実施形態は、次に続く詳細な説明、図面、及び特許請求の範囲に記述されているか又はそれらを考察することによって明らかになる。また、先の本発明の概要及び以下に続く詳細な説明は共に例示として示されているものであり、特許請求対象の本発明の範囲を制限することなく、より深い説明を提供しようとするものであると理解されたい。
【００２３】
[0023]添付図面は、本発明の理解を更に深められるように含まれていて、本明細書に組み込まれその一部を成すものであって、それら図面は、本発明の好適な実施形態を示すとともに詳細な説明と併せて本発明の原理を説明するために供されている。
【図面の簡単な説明】
【００２４】
【図１】ナトリウム結合型金属燃料要素を示している。
【図２】照射された金属燃料要素の断面図を示している。
【図３】本発明の或る実施形態による金属燃料要素を示している。
【図４】本発明の或る実施形態による共生燃料サイクルを示している。
【図５】本発明の或る実施形態による例示となる小型モジュール式反応炉（Small Modula

r Reactor）（「ＳＭＲ」）を示している。
【図６】本発明のＳＭＲ原子力発電所の一例である。
【発明を実施するための形態】
【００２５】
[0030]金属微粒子燃料システムを説明する。金属燃料システムは、核反応炉で使用するための微粒子状金属燃料を含むことができる。微粒子状金属燃料は、少なくとも１つの濃縮合金の複数粒子を含んでおり、それら粒子は燃料カラムへ締固められている。金属微粒子燃料システムは、更に、クラッディング及び／又はガス充填プレナムを含むことができる。
【００２６】
[0031]本発明の或る実施形態による金属燃料システム３０１は、図３に見ることができる。燃料クラッディング管３０３が提供されている。クラッディングの寸法は、反応炉設計によって異なる。既存の反応炉設計については、クラッディング外径は、大凡０．５ｃｍから大凡１．５ｃｍの範囲であり、壁厚さは、大凡０．０３ｃｍから大凡０．０８ｃｍの範囲である。燃料クラッディング管３０３は、低スウェリングＨＴ－９又は酸化物分散強化型（oxide dispersion strengthened）（「ＯＤＳ」）ＨＴ－９から構成されていてもよい。様々な用途に合わせて他の組成又は追加の材料を使用することもできる。燃料クラッディング管３０３は、それぞれ特定の冷却材との適合性のある如何なる低スウェリング合金であってもよい。
【００２７】
[0032]燃料クラッディング管３０３内部の金属燃料は、濃縮合金、例えばウラン又はウラン-プルトニウムの、微小な金属燃料片又は粒子３０７の形態をしていてもよい。燃料粒子は、直径が、大凡５０ミクロンから大凡１０００ミクロンの範囲とすることができる。大凡７５％の所望密度を実現するのに、少なくとも２つの異なった粒子の大きさが使用されていてもよい。大きさの範囲は、それぞれ特定の使用法によって異なる。金属ウラン合金粒子を製造するための技術は、他の用途で知られているであろう。金属燃料粒子の製造には、溶融と固化が速くなるようにアーク溶融技法を使用することができる。アメリシウムの様な揮発性成分の損失は最小限に抑えられるであろう。また、金属ウラン合金粒子を生産するための粉末冶金加工の他の確立された方法である、例えば水素化‐脱水素化及び機械的粉砕は、従来の射出鋳造作業の場合に要求された燃料合金溶融点より遥かに下の温度で行うことができる。
【００２８】
[0033]よく使用される添加合金には、ジルコニウム、モリブデン、ウラン‐超ウラン、又は類似の元素が含まれる。更に、合金は、好適にも再処理燃料由来のアメリシウム、ネプツニウム、及びキュリウムの様なアクチニド金属を含有することができる。
【００２９】
[0034]金属燃料粒子３０７は、燃料クラッディング管３０３の中で、好適には７５％又はそれ以下の密度まで、加振されるか又は突固められて、燃料カラム３０５にされる。スメア密度は、燃料によって占められている初期体積を総体積で割ったものである。大凡７５％のスメア密度を、燃料がクラッディングに向かって膨らむ前に空孔の相互接続とガス放出が起こる最大値とすることができる。加振及び突固めの手順は知られており、金属燃料粒子に適用することができる。
【００３０】
[0035]燃料カラム３０５は、単純なばね仕掛け又は少なくとも一時的に加圧を維持する何か他の装置の様な拘束具３０９によって所定の場所に保持されている。ばねの代わりに小径ロッドの様な他の拘束用装置が使用されていてもよい。プレナム３１１の中の初期ガスは、好適には、熱伝導率を高めるのに十分であるガス、例えば、ヘリウムということになろう。燃料カラム３０５対ガスプレナム３１１の体積比は、大凡０．８対大凡２．０とすることができる。燃料カラム３０５の高さは、それぞれ特定の反応炉に応じて、大凡０．５ｍから大凡１．５ｍの間の範囲とすることができる。ガスプレナム３１１の長さは、

同様に反応炉に応じて、燃料カラム３０５の長さの大凡０．８倍から大凡２倍の間の範囲とすることができる。

【００３１】

[0036]金属燃料システム３０１は、ナトリウム結合型金属燃料の射出鋳造の現行方法に勝る単純化された加工を可能にする。金属燃料システム３０１は、金属燃料のヘリウム結合で運転される。金属ウラン合金粒子を製造するための技術は、他の用途で開発されている。一例として、アルミニウムマトリクスに埋め込まれているウラン‐モリブデン粒子は、研究用反応炉で応用するために開発された。射出鋳造燃料の場合はＶＹＣＯＲ金型の軟化が足かせであったが、微粒子状金属燃料として利用できる合金組成の範囲には制限がない。更に、金属燃料粒子を製造するための方法は、溶融と固化が速くなるようにアーク溶融技法を利用することができる。アメリシウムの様な揮発性成分の損失は、その結果、最小限に抑えられることになろう。同様に、水素化‐脱水素化及び機械的粉砕の様な粉末冶金加工の他の確立された方法も、燃料合金の溶融点より遥かに下の温度で行うことができる。射出鋳造燃料で使用されているＶＹＣＯＲ金型への核分裂性物質のこびり付きによって生じていた廃棄物は殆ど又は一切ない。クラッディング管のナトリウム充填及びその後に続く結合ボイドを除去する作業並びにボイドを非破壊的に検査する作業は、概して、微粒子状金属燃料のための本方法によって排除することができる。この微粒子状燃料加工方法は、遠隔作業向けに使用することができる。

【００３２】

[0037]ナトリウム結合型システムではなくてガス（例えばヘリウム）充填型システム３０１の際立った特徴は、燃料要素を反応炉プール、例えば液体ナトリウムに導入するときに、それら燃料要素を上から下へ加熱する必要を排除したことである。ヘリウムは、その高い熱伝導率のために好適である。これは、燃料装荷設備の大幅なコスト節約をもたらすのみならず、燃料カセット装荷手順の合理化ももたらす。

【００３３】

[0038]長期（～２０年）燃料再補給間隔のＳＭＲの様な小型高速炉は初期炉心装荷用に濃縮された合金燃料（例えばウラン）を使用して配備することができる。ＳＭＲは、内部増殖比１を基準とする自発燃料再補給式であり、繰り返されるリサイクルを経るうちに、初期の濃縮合金燃料組成は徐々に自身を超ウランに富む、例えば定常状態同位体分布の組成へと変換させてゆく。最適な大凡８－１０原子％燃焼度を実現するのが好適であるが理想より低い他の燃焼度が実現されてもよいとされる１５年から２０年の燃料再補給間隔の終了時点で、炉心全体が取り出され、高温冶金（乾式）リサイクルに掛けられて、置換用の炉心が作成される。新しい炉心のために必要な核分裂性含有量は、以前の炉心の中に自己生成されているので、再加工に必要なのは原料だけで、当該原料は、例えば、大凡８－１０重量％の劣化ウラン装填物であり、一方で大凡８－１０重量％の核分裂生成物廃棄物がリサイクル工程で抽出される。

【００３４】

[0039]一例として、混合濃縮ウラン／超ウラン合金燃料は、ここに記載されている再加工プロセスを採用することができるであろう。その単純さのおかげで、当該プロセスは、リサイクル原料が放射性であるという性質に鑑みて、遠隔的に遮蔽材の裏側で実施されることになろう。このプロセスは、金属燃料合金粉末を作成するための標準的な粉末冶金手順を伴い、それに続けて、数百ミクロンの大きさまでの金属燃料合金粒子に加振締固めを施して、ガス、例えばヘリウムを結合させる燃料クラッディングにする。反応炉に戻された後、大凡１原子％燃焼度になったところで、粒子床は核分裂ガスの発生が起動力となって膨れてゆき、核分裂ガスで満たされた空孔が互いに接続されて、スメア密度約７０％から約７５％でクラッディングの内部半径を満たしている、固体合金燃料形態へと再構築されてゆく。

【００３５】

[0040]８－１０重量％の劣化ウラン原料は、等重量％の破砕酸化物粒子の形態をしているＬＷＲ使用済核燃料（「ＬＷＲ　ＳＮＦ」）に置き換えることもできよう。これらの破

砕Ｕ／Ｐｕ／ＭＡ核分裂生成物酸化物粒子は、以下に説明されているプロセスで生成されるものであって、それらがリサイクルされたウラン／超ウラン合金粒子とよく混ぜ合わされ、混ぜ合わされた粉末が加振締固めに掛けられて、先の燃料クラッディングにされる。プロセスは、全て遠隔に行うことができる。反応炉に戻された後、大凡１％燃焼度になると、粒子床は核分裂ガスの発生を受けて膨れてゆき、酸化物粒子が金属燃料合金マトリクスに埋め込まれている固体サーメット燃料の形態へと再構築されてゆく。マトリクスは、相互接続した空孔を含有しており、スメア密度約７０％から約７５％でクラッディングの内部半径を満たしている。

【００３６】

[0041]破砕酸化物は、リサイクル工程により除去される大凡８－１０重量％の核分裂生成物に置換するのに必要な原料となり得る。原料は、主としてウラン２３８で構成されているのが好適であろう。原料は、更に、ＬＷＲのワンススルーサイクルでは処分されるべき廃棄物と見なされている、Ｐｕを約１．５重量％、マイナーアクチニドを約０．１５重量％、及び核分裂生成物を約４重量％含有していてもよい。

【００３７】

[0042]ＬＷＲ　ＳＮＦ中には微量のプルトニウムとマイナーアクチニドが存在しており、それらがＬＷＲ　ＳＮＦを処分することを極めて困難にしていたのであるが、その様な微量のプルトニウムとマイナーアクチニドは、本発明の実施形態の共生燃料サイクルでは閉高速炉燃料サイクルでの複数回のリサイクルを経る間に使い果たされてしまう。具体的な利点には、核分裂消費に向けてリサイクルされるように、揮発性のマイナーアクチニドであるアメリシウムが他の超ウラン元素と共に留まっていることがある。酸化物粒子中に残存する核分裂生成物は、高速炉燃料がリサイクルされたときに捕獲されるであろう。ＬＷＲ　ＳＮＦからの汚染されたウランは、高速炉サイクル中は残存し、複数回のリサイクルを経て、超ウランへと増殖され、そのまま核分裂消費に燃料として供されることになる。これにより、ウラン鉱の採掘及び精錬に対する要求が軽減されるであろう。酸化物粒子を汚染する余分な核分裂生成物は、中性子捕獲断面積が小さいため、高速炉の性能への影響は極僅かしかない。ＬＷＲの汚染されたジルカロイクラッディングには、合金燃料粒子を加工するため又は核分裂生成物廃棄物形態を加工するための原料としての使い道がある。

【００３８】

[0043]金属系燃料のための微粒子ベースの加工方法は、セラミック系燃料粒子と金属系燃料粒子の配合を可能にし、その結果、自己形成式のサーメット燃料形態が得られる。金属系／セラミック系粒子混合物中の酸化物含有量が１０重量％のとき、サーメットは、約８５体積％以上の金属相中にセラミックが約１５体積％までの割合で含まれている。これは、サーメット燃料加工及び照射性能にとって妥当な範囲内である。

【００３９】

[0044]燃料形態のこのセラミック含有量は、その熱伝導率を約３０％落とすかもしれない。これは従来の高速増殖炉では問題となり得るが、本特許請求の対象である反応炉、即ちＳＭＲにこの問題はない。ＳＭＲ炉心の出力密度は、大凡２０年の燃料補給間隔を達成するべく下げられている。燃料ピンの線形発熱率は下げられており、よって、燃料の熱伝導率が減少しても燃料ピンの中心線温度が著しく上昇することはない。これは、燃料照射性能のみならず反応炉の受動的安全性能にとっても重要な特徴である。

【００４０】

[0045]大凡８－１０原子％燃焼度を達成しての大凡２０年に亘る燃料サイクルの後、燃焼したサーメット燃料の炉心はリサイクルのために取り出される。サーメット燃料に対して用いられる高温冶金法（乾式）リサイクルは、合金燃料用のプロセスに比較して１つの追加工程を含むことになろう。これは、大凡８－１０重量％の酸化物粒子を金属状態へ還元することである。その他の点では、高温冶金プロセスは上述のものと同様である。

【００４１】

[0046]破砕ＬＷＲ使用済燃料原料は、ＬＷＲ使用済燃料のための幾つかの十分に開発さ

れた（乾式）脱被覆／破砕プロセス、例えば、原子力国際還元／酸化（Atomics International Reduction/Oxidation）（「ＡＩＲＯＸ」）、酸化物燃料の酸化と還元（Oxidation and Reduction of Oxide fuel）（「ＯＲＥＯＸ」）、又は酸化物燃料のための微分化及び脱被覆技術（Pulverization and Decladding technology for Oxide fuel）（「ＰＵＬＤＯＸ」）のうちの１つ又は別のどれかによって生成されてもよい。これらのプロセスは、ＬＷＲ燃料クラッディングを閉じ込められた雰囲気中に割る工程と、それに続く１つ又はそれ以上の、酸化、例えばＵＯ２からＵ３０８への酸化のサイクルと、還元、例えばＵＯ２への還元のサイクルから成っている。約３０％という関連する密度変化が、クラッディングを破裂させ、酸化物燃料を粉々に砕いて、破裂したクラッディングからの分離を促す。約９０％から約９９％の酸化物回復を達成することができる。酸化は、摂氏約４００度の空気又は酸素雰囲気中に行われるのが好適である。還元は、摂氏約７００度の希釈Ｈ２含有アルゴン雰囲気中に行われるのが好適である。ガス状で揮発性の核分裂生成物が放出され捕獲される一方で、非揮発性の核分裂生成物は破砕された酸化物粒子中に留まる。

【００４２】

[0047]加振締固め再加工工程に必要な粒子の大きさ分布は、酸化／還元サイクルの回数及び温度滞留の保持時間によって制御することができる。更なる大きさ削減が必要であるか又は好適である場合には、その様な大きさ削減は当技術で知られているマイクロ化技法を用いて実現することができる。破砕作業で放出されたガス状で揮発性の核分裂生成物を捕獲するための技術は標準であり、得られる廃棄物形態は、既に高温冶金リサイクルプロセスで要求され使用されているものと何ら変わりはない。

【００４３】

[0048]所望であれば、本発明の実施形態は、最初のリサイクル２０年を待つことなく、代わりに上述のＳＭＲ反応炉の初期炉心装荷に自己形成式のサーメット燃料を投入することにより、ＬＷＲ　ＳＮＦ遺物の一掃を加速することもできよう。この加速には、遠隔での遮蔽式燃料加工及びＬＷＲ処理施設を、２０年待ってＳＭＲ使用済炉心の最初のリサイクルの実践活動に間に合うように建設するのではなく、ＳＭＲ配備の実践活動の当初に建設することが伴うことになろう。

【００４４】

[0049]ＬＷＲ　ＳＮＦ遺物の一掃を加速するには、最初の炉心装荷の酸化物含有量を燃料形態の約１０重量％から約２５重量％へ増加することになるかもしれない。これは、セラミックと約２０％の濃縮金属系燃料原料の混合物中に核分裂性成分が約１５％含有されていることに相当する。これは、サーメットの粉末冶金加工にとって実行可能な範囲内に留まる。それは、同様に、ＳＭＲの低粉末密度燃料ピンを所与として、熱伝導率の観点から実現可能な範囲内に留まる。約１５トンの燃料含有量のそれぞれのＳＭＲ炉心は、従って、約３．７５トン又はそれ以上のＬＷＲ　ＳＮＦを消費することになろう。ＳＭＲ炉心の最初のリサイクルへ至る大凡２０年の間に、ＳＭＲの建設ペースを年当たり１００基として、この共生サイクルは、全体で約６０，０００トンのＬＷＲ　ＳＮＦ遺物のうちから０．２５＊１５＊１００＊２０＝約７５００トンを消費することになろう。

【００４５】

[0050]増殖炉は２０３０年頃から開始して配備されてもよい。ここで、ＬＷＲ　ＳＮＦの引落速度については、低出力密度ブランケットに自己形成式サーメット燃料を含有している高含有量酸化物を使用することによって更に加速させられる余地がある。代わりに、破砕されたＬＷＲ　ＳＮＦを、高速炉閉燃料サイクルの中への注入に向けてＵ、Ｐｕ、ＭＡ、及び核分裂生成物を保留したまま、ブランケット加工用の金属系原料に還元してもよいであろう。

【００４６】

[0051]そのうち埋蔵鉱量は乏しくなってゆくであろうし、濃縮ウランの価格が大きく影響して、ＳＭＲ及び増殖炉の新規配備は、濃縮ウランではなく、例えば、超ウラン又は超ウランと濃縮ウランの配合物によって推進されることになるであろう。この原料は、ＬＷＲ　ＳＮＦの湿式処理から生じさせる必要はなく、ＳＭＲ及び増殖ＳＮＦから回収するこ

とができる。これは、ＬＷＲ　ＳＮＦが約１．５重量％の核分裂物質しか含有していないのに対し、ＳＭＲ及び増殖ＳＮＦは、約１５重量％から２０重量％の核分裂物質を含有しており、よって同じ核分裂物質回収量を収穫する場合の要求再処理スループットが１０分の１に軽減されるからである。増殖ブランケットでさえ、同じ質量のＬＷＲ　ＳＮＦに比べると５倍多くの核分裂物質を有すると予測され得る。ここに提案されている共生燃料サイクルでは、ＬＷＲ　ＳＮＦは、劣化ウラン代用物として扱うことができ、核分裂物質の源として扱われるものではない。ＬＷＲ　ＳＮＦ中に存在する微量の核分裂物質は、必然的に、提案されている共生閉燃料サイクルの中へ捕獲されてゆくが、但し費用効率の高いやり方で貢献する。

【００４７】

[0052]この提案されている、開燃料サイクルから閉燃料サイクルへの進化的な転換は、ここに提案されている、湿式処理での如何なる要件をも排した共生乾式技術を使用すれば必ずや成し遂げることができるはずである。

【００４８】

[0053]最終的な継続維持可能な形に実現された共生燃料サイクル４０１の一例が図４に示されている。最初に鉱石４０３が濃縮４０５される。濃縮された鉱石の少なくとも一部が、ワンススルーサイクルのＵＯＸ加工４０７に給送される。次いで、生成物がＬＷＲ－ＵＯＸ４０９、ＵＯＸ貯蔵４１１、及び／又はＡＲＯＸ４１３に通される。生成物は、次に、ＳＭＲ４１７に進入する前に半径方向ゾーニング用に配合４１５されるか、又はＦＢＲ４１９用のＬＷＲ　ＳＮＦ酸化物ブランケットに使用される。

【００４９】

[0054]代わりに、濃縮された鉱石は、ＦＢＲ４１９に進入する前に、増殖炉ドライバ初期運転在庫用に約２０％まで更に濃縮されてもよい。濃縮された鉱石は同様に、ＳＭＲ高濃縮ゾーンドライバ初期運転在庫用に約１５％まで濃縮されてもよい。濃縮された鉱石は、次に、ＳＭＲ４１５に進入する前に配合４１５されてもよいし、又は直接ＳＭＲ４１５に進入させてもよい。

【００５０】

[0055]ＳＭＲ４１５は、還元部４２３へ給送される低濃縮ゾーンを出力することができる。ＦＢＲ４１９からのブランケットも還元部４２３に給送される。ＳＭＲ４１５、還元部４２３、及び／又はＦＢＲ４１９は、ドライバをパイロ４２１へ出力することができる。自己生成サイクルでは、パイロ４２１からの出力は、加工部４２５の中へ給送され、ＳＭＲ４１７に戻される。ネット生成サイクルでは、パイロ４２１からの出力は、加工部４２７の中へ給送され、ＦＢＲ４１９へ戻される。パイロ４２１からの出力は、更に、ＦＰ廃棄物形態４２９へ給送され、保管場所４３１に貯蔵される。

【００５１】

[0056]この技術は、現行技術に対する修正型として自己形成サーメット燃料を作成することができる。ＬＷＲ　ＳＮＦ及び／又は他の酸化物燃料形態は、湿式再処理を展開する必要なしに、高速炉、例えばＳＭＲの、閉燃料サイクルの中へ導入することができる。一部の特定の実施形態は、以下の利点をもたらすことが期待できる。即ち、

[0057]ａ．ＬＷＲによって生成されたプルトニウム及びマイナーアクチニドを高速炉閉燃料サイクルの中に閉じ込め、その中でそれらを燃料として消費できるようになる、

[0058]ｂ．ＬＷＲによって生成された核分裂生成物を高速炉閉燃料サイクルの中へ挿入し、後に、処分するのに安定した廃棄物形態で埋蔵できるようになる、

[0059]ｃ．揮発性アメリシウムマイナーアクチニドを他のアクチニドと共に高速炉リサイクルで燃料として使用できるように留保することのできる低温処理を採用し、それによって、それらが保管場所の廃棄物毒性にとって長期要因として寄与できないようにする、

[0060]ｄ．高温冶金リサイクルプロセスによって既に作成されているものの他に、新たな廃棄物形態が生じることは、たとえあったとしても、ごく少数である、

[0061]ｅ．ウラン鉱石の使用効率を１００倍近く増加させる、

[0062]ｆ．高速炉サーメット燃料のための乾式リサイクル技術の配備やＬＷＲ　ＳＮＦ

を高速炉閉燃料サイクルの中へ注入するための乾式技術の配備に対する必要性が出てくる前に、数十年の遅延時間を猶予することのできる柔軟な戦略を提供することができる。代わりに、それは、ＳＭＲが生産に入るとすぐに開始して、遺物ＬＷＲ　ＳＮＦのより迅速な引落を促すこともできよう。

【００５２】

[0063]微粒子状金属燃料は、核分裂性及び増殖性の元素を含有した如何なるセラミック系物質にとってもホストマトリクスとなり得る。唯一の制約は、セラミック系物質の濃度が、好適には、照射された際にホスト金属マトリクスが持続し得るように制限されていることである。金属マトリクスが持続すれば、金属燃料の優れた特性全てを温存させることができる。１つの重要な例は、揮発性のアメリシウムを意図的に収集し、それを揮発性のより低い酸化物へ酸化させて、アメリシウムを酸化物として金属燃料マトリクスの中に包含することを促すことによる、アメリシウムの核分裂である。

【００５３】

[0064]従来の燃料再処理技法は、アメリシウムの高い揮発性のせいでアメリシウムを含有することが困難であった。本発明の実施形態は、好適にも、全ての廃棄生成物の中で最も厄介なものの１つであるアメリシウムを有効に捕獲し核分裂させる。従って、アメリシウムは廃棄物として終わらずに、エネルギーをそこから得ることのできるもう１つの核分裂性同位体となる。

【００５４】

[0065]非飽和ゾーン保管場所からのオフサイト線量の研究は、約６，４０００年の時点でのピーク線量は、半減期が２４１万年のアルファエミッタであるＮｐ２３７に起因することを示している。Ｎｐ２３７は、４３２年の半減期を有するＡｍ２４１のアルファ崩壊の娘生成物であり、Ａｍ２４１自体は、１４．３５年の半減期を有するＰｕ２４１のベータ崩壊の娘である。

【００５５】

[0066]Ａｍ２４１とＰｕ２４１はどちらも核反応炉排出燃料中に生成される。閉高速炉燃料サイクルでは、Ｐｕ２４１は、使用済燃料排出時に重金属で約０．５重量％存在し、Ａｍ２１４は、重金属で約０．１５重量％存在する。開サイクルＬＷＲについては、割合はそれぞれ０．１９重量％と０．４重量％である。これらは排出燃料に占める重量分率は比較的小さいが、少なからず、長期廃棄物処分に関して決定的な有害性を引き起こす。

【００５６】

[0067]究極的に核廃棄物保管場所からのオフサイト線量を決定付けることになるＮｐ２３７の蓄積を防止するためには、その先祖の同位体であるＰｕ２４１とＡｍ２４１をリサイクルして高速炉の中へ戻し、そこで核分裂によって消費されるようにするのが有益であろう。それらは共に高速炉の生産性（核分裂性）のある燃料であるため、反応炉設計の視点からすれば望ましい。但し、Ａｍの場合は、Ａｍが高速炉リサイクルの基本的な高温冶金プロセスで通常遭遇する温度に揮発性を有する核種であることから、リサイクルでは困難に行きあたる。

【００５７】

[0068]高速冶金プロセスは、３つの高温プロセスを伴い、それらのプロセスではアメリシウム損失が起こり得る。１つ目は、大凡摂氏５００度という比較的低い温度での電気精錬作業であり、そこではアメリシウムは塩化物として存在しており、揮発的損失は無視できる程度に僅かであると予想される。２つ目は同様の温度での液体カドミウムカソードのレトルト処理であり、最後に、最も厄介なアメリシウム損失は、大凡摂氏１６００度での燃料スラグの射出鋳造中に起こる可能性がある。射出鋳造プロセス時、アメリシウムは気化して、設備の低温部に蒸着する傾向がある。鋳造技術を試したところ、温度滞留時間を短縮したり溶融物の上の気体体積を減らしたりすることにより、アメリシウム損失の低減には一部成功した。とはいえ、これらの解決策は理想的ではない。

【００５８】

[0069]上で論じた金属燃料及び加工方法は、クラッディング内部の燃料を微粒子状の合

金、例えばウランとして記述しており、当該金属燃料及び加工方法により、短い照射時間の後、燃料は、早期の金属燃料設計とは違って多孔質固体ピンとして挙動することになる。幾つかの利点は、ナトリウム結合ではなくヘリウム結合としたこの微粒子設計に固有のものである。金属燃料は、金属燃料微粒子マトリクスへの微粒子状使用済市販ウラン酸化物の添加を含むように拡大されてもよい。微粒子状使用済燃料の濃度が或る一定の限界より下に保たれる限り、微粒子状金属燃料は燃料ピン内に持続的なマトリクスを形成するものと予想され得る。微粒子状使用済燃料の体積分率は、金属燃料の持続的マトリクスを保証するには大凡２５％より下に保たれるのが好適である。金属燃料マトリクスが持続されれば、金属燃料に付随する有利性が温存されることになり、つまりは、高い熱伝導率及び相互接続された空孔は、ナトリウム結合に代わるヘリウム結合と共に、最も重要な特性の一部である。

【００５９】

[0070]本発明の一部の特定の実施形態の１つの重要な改善は、微粒子状金属燃料マトリクスが他の微粒子状燃料のための普遍的なホストになれるようにしたことである。ホスト金属マトリクスという概念を用いれば、アメリシウムは、プロセスの工程で意図的に気化され、収集されて、酸化され、そこにカドミウムカソードが戻される。アメリシウム生成物は、収集用コールドフィンガに集められて、酸化され、微粒子としてホスト金属マトリクスに包含されることになる。

【００６０】

[0071]アメリシウム酸化物を包含物として備えた微粒子状金属高速炉燃料は、次に、照射されて、アメリシウムを核分裂させるが、このときアメリシウムが破壊されるにとどまらず更にはエネルギーが得られる。好適な実施形態の微粒子状金属マトリクス中の最大アメリシウム酸化物量は、大凡１重量％を超えることはないと予想される。大凡１重量％のアメリシウム酸化物量が、再処理燃料についての予想される最大量であろう。

【００６１】

[0072]使用済燃料を特に微粒子状の形態にあるときに金属燃料微粒子マトリクスに包含するという概念は、ウラン炭化物、ウラン窒化物、混合ウラン‐プルトニウムの酸化物、炭化物、及び窒化物の様な、他の使用済燃料へ拡大することができる。主な条件は、金属燃料の有益性全てが実現されるように、マトリクス中の金属燃料の濃度は持続的マトリクスを形成するのに十分に高くなくてはならないということであろう。炭化物、窒化物、及び酸化物の体積分率は、金属燃料の持続的マトリクスを保証するためには、大凡２５％より下に保たれるのが好適である。

【００６２】

[0073]金属微粒子マトリクス中に非金属形態の粒子を包含するというこの概念は、通常の照射過程におけるウラン‐ジルコニウム及びウラン‐プルトニウム‐ジルコニウムの燃料中の非金属系包含物を観察することによって裏付けられる。これらの燃料中のジルコニウムは、システム内で酸素及び窒素と結び付いて、ジルコニウム酸化物及びジルコニウム窒化物の包含物を形成する傾向がある。また、ジルコニウムは、黒鉛坩堝の溶融から持ち越された炭素と結び付いて、金属マトリクス中にジルコニウム炭化物の包含物を形成する。これらの酸化物、窒化物、及び炭化物の包含物には、性能への有害な影響は殆ど又は全くない。これらの包含物の体積分率は、アメリシウム酸化物の期待体積分率の範囲に十分納まる。アメリシウム酸化物の体積分率は、大凡１％の範囲となろう。実際には、これらの炭化物及び酸化物の包含物は、金属燃料のために存在する幅広い経験的な基礎材料の一部である金属燃料の意図していない特性であった。

【００６３】

[0074]ここに開示されている実施形態は、ＳＭＲに一体化されているのが望ましいが、とはいえ、本発明の微粒子状金属燃料及びその実施形態は、他の反応炉概念にも利用可能性を有している。炉心構成、燃料取り扱い設備、及びＳＭＲ再処理及び再加工技術は、全て、ここに記載されている実施形態から恩恵を受けることができる。その結果は、設備及び燃料の費用を縮小し、ＳＭＲの独自性と簡易性を高め、現在は暫定貯蔵されている７０

，０００トンのＬＷＲ使用済燃料の行く末を懸念する者らにとっては魅力があるに違いない。本技術は、ＳＭＲ以外にも応用が利き、世界中の多様な高速炉設計に適用することもできよう。

【００６４】

[0075]図５に示されている、本発明の例示となるＳＭＲシステム５０１は、大気圧液体ナトリウム５０７のタンク５０５に沈められているウラン燃料炉心５０３を含んでいる。ＳＭＲシステム５０１は、更に、制御棒５１３を含んでいて、コンクリート５１５に包まれている。タンク５０５からの液体ナトリウム５０７はポンプ５０９によって炉心５０３に送り込まれ、炉心を通って、熱を、同じくナトリウム５０７のタンク５０５内に沈められている熱交換器５１１へ運び去る。ナトリウム５０７は、摂氏約５１０度まで加熱されてもよい。

【００６５】

[0076]図６は、大型エネルギー生成システム６０１内のＳＭＲシステム５０１を示している。加熱されたナトリウム５０７は、熱交換機５１１に通され、二次的なナトリウムを加熱することができ、加熱された二次的なナトリウムが今度は熱交換器６０３に通され、そこで二次的なナトリウムは、超臨界（殆ど液状）二酸化炭素を加熱する。加熱された超臨界二酸化炭素は、次に、二酸化炭素ブレイトンサイクル建屋６０７内の発電機６０５で電気を作るためのガスタービンを回すのに使用される。示唆されている様に、この型式のシステムは、典型的に、ブライトンサイクルと呼ばれており、ＳＭＲに、従来のＬＷＲ蒸気駆動式タービンより遥かに高い、大凡３９％から大凡４１％又はそれ以上の熱効率（電気に変換される熱エネルギー）を提供することができる。その上、廃熱は、空間暖房、脱塩淡水化、工業プロセス加熱の様な、低温の必要性を満たすために使用することもできるし、或いは冷却塔を通して放散させてもよい。

【００６６】

[0077]小型ナトリウム冷却型高速炉は、ＳＭＲを単純化されたフェイルセーフ制御付きで運転させることを可能にする重要な固有の安全特性を実証しており、それにより行政当局による認可が速やか進むであろう。反応炉への冷却流の喪失又は反応炉システムからの熱を拒絶する能力の喪失の様な事故的状況への対応では、本反応炉の実施形態は、人的介入或いは安全システムの介入なしに自らを活動停止させることができ、というのも、反応炉の冷却材が熱せられると、反応炉は、自己修正式に、炉心構造を熱膨張させて炉心からの中性子漏れを増加させることで出力レベルを下げることができるからである。

【００６７】

[0078]ＳＭＲの運転要件は、従来の核システムより遥かに単純であり、反応炉を電気需要レベルが変化することによって持ち込まれる装荷要件に従わせるようにしているのが特徴である。合金燃料は、性能と加工の両方の面から十分に実証されており、そのまま直接に長期燃料補給時間間隔要件を満たすことができる。

【００６８】

[0079]反応炉炉心は、燃料補給の必要なしに約２０年又はそれ以上にも亘る長寿命を有することであろう。反応炉炉心全体は、２０年毎に１回取り換えればよいであろう。よって、反応炉システムでは、作業員が燃料を取り扱う必要はない。ユニット全体は、物理的に且つ電子モニターを用いてシールすることができるので、如何なる侵入の試みも容易に検知される。燃料への直接アクセスを得る必要性又は能力を排除したこととスマートな監視システムの使用は、作業員の要件を軽減するのみならず、拡散に関する懸念の解消にもつながる。また、ＳＭＲは、格納性及びテロリストの活動からの防護性を高める地下への設置に対応するのに十分に小さい。最後に、本システムの実施形態は、荷船で輸送し、現場でモジュール工法を使用して設置することができるほどに小さく、この様に遠隔で製造し連続生産の経済性を獲得できることは、望ましい利点である。

【００６９】

[0080]燃料カートリッジが製造者／設計者／加工業者の施設に戻されたとき、使用された核物質のほぼ全てをリサイクルし、将来のカートリッジに燃料として使用することがで

きるので、地質的な保管場所に貯蔵されることになる最終廃棄物の量及び放射能毒性は大幅に低減される。従来の軽水炉からの廃棄物と違って、ＳＭＲからの物質は幾万年にも亘って貯蔵される必要がない。ＳＭＲからのリサイクルできない物質は、廃棄物が元のウラン鉱石に関連付けられる放射線レベルまで減衰する前に、数百年間の貯蔵期間を要するだけである。

【００７０】

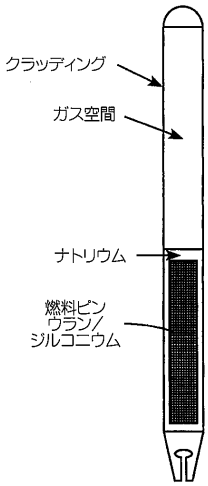
[0081]以上の説明は、本発明の好適な実施形態に向けられているが、当業者には他の変型及び修正が自明となることであり、その様な変型及び修正は本発明の精神又は範囲から逸脱することなく行われ得ることに言及しておく。更に、以上に明示的に述べられていなくとも、本発明の１つの実施形態に関連付けて記述されている特徴は、他の実施形態に関連付けて使用することもできる。

【符号の説明】

【００７１】

３０１　金属燃料システム
３０３　燃料クラッディング管
３０５　燃料カラム
３０７　金属燃料粒子
３０９　拘束具
３１１　ガスプレナム
４０１　共生燃料サイクル
４０３　鉱石
４０５　濃縮
４０７　ＵＯＸ加工
４０９　ＬＷＲ－ＵＯＸ
４１１　ＵＯＸ貯蔵
４１３　ＡＲＯＸ
４１５　半径方向ゾーニングに備えた配合
４１７　ＳＭＲ
４１９　ＦＢＲ
４２１　パイロ
４２３　還元部
４２５　加工部
４２７　生成部
４２９　ＦＰ廃棄物形態
４３１　保管場所
５０１　ＳＭＲシステム
５０３　ウラン燃料炉心
５０５　タンク
５０７　液体ナトリウム
５０９　ポンプ
５１１　熱交換器
５１３　制御棒
５１５　コンクリート
６０１　大規模エネルギー生成システム
６０３　熱交換器
６０５　発電機
６０７　二酸化炭素ブレイトンサイクル建屋

【図１】



【図２】

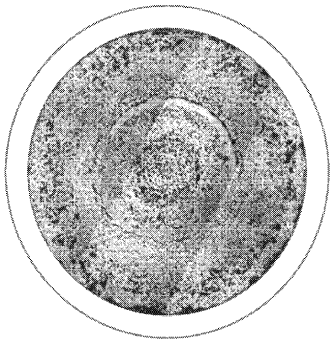


FIG. 2

【図３】

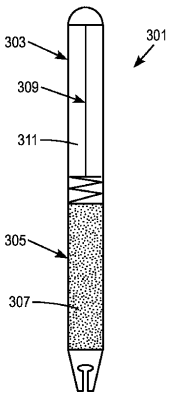
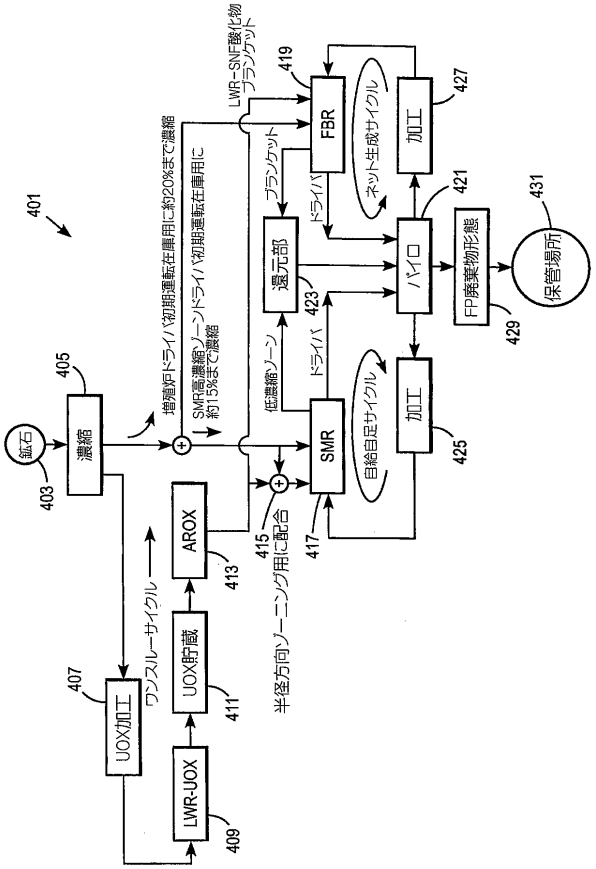


FIG. 3

【図４】



【図５】

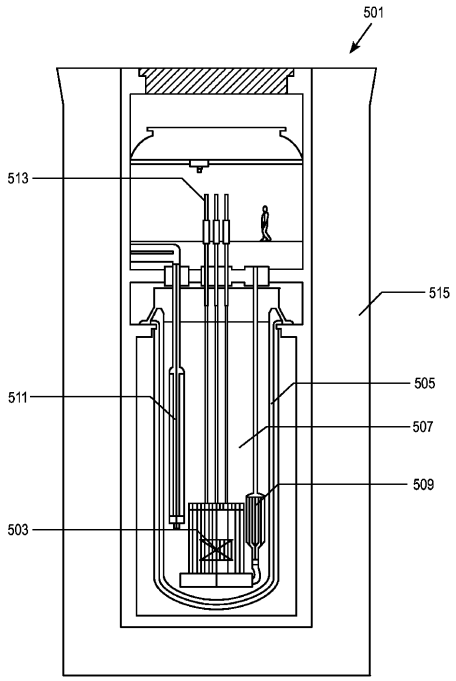


FIG. 5

【図６】

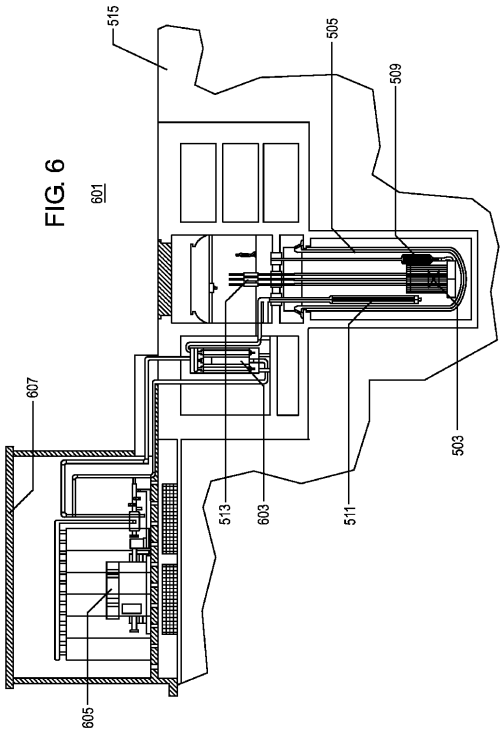


FIG. 6

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US 10/35412

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC(8) - G21C 3/02 (2010.01)
USPC - 376/413, 424
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)
USPC: 376/413, 424

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
USPC: 376/414 (text search) Find search terms below.

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
PubWEST (PGPB,USPT,EPAB,JPAB), Google Scholar
nuclear reactor, fuel, particle, particulate, metal, alloy, pin, element, assembly, cartridge, system, rod, helium, supercritical carbon dioxide, Brayton cycle

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X --- Y	US H000689 H (CHRISTIANSEN et al.) 03 October 1989 (03.10.1989) fig 3, 5, 6; col 3 ln 18-24; col 4 ln 24-31; col 4, ln 64 to col 5, ln 13; col 6 ln 3-27	1-3, 7, 8, 10 --- 4-6, 9, 11-14
Y	US 2008/0144762 A1 (HOLDEN et al.) 19 June 2008 (19.06.2008) para [0128]	4
Y	US US 4,717,534 A (MORITA) 5 January 1988 (05.01.1988) fig 2, 3; col 5, ln 10-27	5, 6, 11-14.
Y	US 2001/0007584 A1 (ADAMSON et al.) 12 July 2001 (12.07.2001) para [0021], [0023]	9
Y	US 6,674,830 B2 (KATO et al.) 06 January 2004 (06.01.2004) col 2 ln 49-52; col 3 ln 33-59	12, 13
Y	US 2007/0280400 A1 (KELLER) 6 December 2007 (06.12.2007) para [0012], [0014]-[0021]	13

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐

* 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	Date of mailing of the international search report
13 August 2010 (13.08.2010)	31 AUG 2010
Name and mailing address of the ISA/US Mail Stop PCT, Attn: ISA/US, Commissioner for Patents P.O. Box 1450, Alexandria, Virginia 22313-1450 Facsimile No. 571-273-3201	Authorized officer: Lee W. Young PCT Helpdesk: 571-272-4300 PCT OSP: 571-272-7774

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2009)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US 10/35412

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:
Group I: claims 1-14
Group II: claims 15-21

--- see extra sheet for more information ---

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.

2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.

3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☒ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:
1-14

Remark on Protest

☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.

☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.

☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US 10/35412

Box III - Observation where unitiy of invention is lacking (continued)

This application contains the following inventions or groups of inventions which are not so linked as to form a single general inventive concept under PCT Rule 13.1.

Group I: claims 1-14: directed to a metal fuel system comprising particulate metal fuel using an inert gas as a heat transfer medium.

Group II: claims 15-21: directed to a method for recycling or refabricating metal fuel, the method comprising: extracting fission product waste product from a fuel column; adding a replacement material approximately equal to the percentage burn up; creating a metal fuel alloy powder; and vibrocompacting the metal fuel allow powder into a replacement core.

The inventions listed as Groups I - II do not relate to a single general inventive concept under PCT Rule 13.1 because, under PCT Rule 13.2, they lack the same or corresponding special technical features for the following reasons:

Group I does not include the inventive concept of recycling or refabricating metal fuel, as required by Group II.

Group II does not include the inventive concept of a metal fuel system comprising particulate metal fuel using an inert gas as a heat transfer medium, as required by Group I.

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(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,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN,TD,TG),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,JP,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,RO,RS,RU,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

(74)代理人 100147511
弁理士 北来 亘
(72)発明者 ウォルターズ，レオン・シー
アメリカ合衆国アイダホ州８３４０１，アイダホ・フォールズ，グレンイーグルス・ドライブ ５０２９