

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6336986号
(P6336986)

(45) 発行日 平成30年6月6日(2018.6.6)

(24) 登録日 平成30年5月11日(2018.5.11)

(51) Int. Cl.		F 1	
G 2 1 D	5/02	(2006.01)	G 2 1 D 5/02
G 2 1 C	1/32	(2006.01)	G 2 1 C 1/32
G 2 1 C	1/00	(2006.01)	G 2 1 C 1/00 A
G 2 1 C	15/02	(2006.01)	G 2 1 C 15/02 B
G 2 1 C	5/00	(2006.01)	G 2 1 C 15/02 R

請求項の数 36 (全 30 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2015-532038 (P2015-532038)	(73) 特許権者	515069358
(86) (22) 出願日	平成25年9月12日 (2013.9.12)		ロゴス テクノロジーズ リミティド ラ
(65) 公表番号	特表2016-515191 (P2016-515191A)		イアビリティ カンパニー
(43) 公表日	平成28年5月26日 (2016.5.26)		アメリカ合衆国, バージニア 22031
(86) 国際出願番号	PCT/US2013/059445		, フェアファックス, プロスペリティ ア
(87) 国際公開番号	W02014/043335	(74) 代理人	100099759
(87) 国際公開日	平成26年3月20日 (2014.3.20)		弁理士 青木 篤
審査請求日	平成28年9月9日 (2016.9.9)	(74) 代理人	100102819
(31) 優先権主張番号	61/699,864		弁理士 島田 哲郎
(32) 優先日	平成24年9月12日 (2012.9.12)	(74) 代理人	100123582
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 三橋 真二
		(74) 代理人	100171251
			弁理士 篠田 拓也

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 モジュール型の可搬式原子力発電機および当該可搬式原子力発電機への燃料補給方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

可搬式原子力発電機であって、

原子炉炉心と制御システムと冷却材流反転構造とを収容する原子炉出力モジュールであって、統合型出力変換モジュールと発電とに提供される冷却材又は作動流体中において熱エネルギーを発生させるために、核燃料を燃焼させる原子炉出力モジュールと、

ターボ機械と熱交換器とを備える出力変換モジュールであって、前記原子炉出力モジュールからの前記冷却材又は作動流体から前記熱エネルギーを受け取り、且つ、発電モジュールに提供される機械的エネルギーを発生させる出力変換モジュールと、

発電機 - モータと、電子コントローラと、無停電電源装置とを備える発電モジュールであって、前記出力変換モジュールから機械的エネルギーを受け取って、電気エネルギーを発生させる発電モジュールと、

を備え、

前記原子炉出力モジュールと前記出力変換モジュールと前記発電モジュールとは、運転可能な原子炉を単一の容器として形成するために互いに熱流体力学的に連結されるように構成されており、

前記原子炉出力モジュールはさらに、燃料補給作業が、未使用又は使用済みの燃料を収容する原子炉出力モジュールを取り外すことと、前記原子炉出力モジュールを未使用の核燃料を収容する新しい原子炉出力モジュールと交換することとによって行われるように構成されている、

可搬式原子力発電機。

【請求項 2】

前記原子炉出力モジュールと前記出力変換モジュールと前記発電モジュールとは、互いに別個に製造及び輸送することができ、さらに、水平的構成又は垂直的構成の形で動作するように構成されている、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3】

前記原子炉出力モジュールと前記出力変換モジュールと前記発電モジュールとはさらに、熱伝達表面を横断する自然冷却材循環を介して受動的に冷却されるように構成されている、

10

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 4】

前記原子炉出力モジュールと前記出力変換モジュールと前記発電モジュールとはさらに、外部の配管又は装置を必要とすることなしに自己完結型ユニットとして動作するように構成されている、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 5】

前記原子炉出力モジュールは、耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心を備える、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 6】

20

さらに、炉心の構造的サポートを提供する一方で、伝導熱伝達機構によって前記炉心から外側フィンへの崩壊熱エネルギーの伝達を確実なものにする内側フィンによって画定されている冷却材経路を備え、

前記冷却材経路は、冷却材の完全喪失時にさえ、前記可搬式原子力発電機を取り囲む環境に対して、崩壊熱エネルギーを安全且つ受動的に伝達するように構成されている、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 7】

前記原子炉出力モジュールは、さらに、

(1) 安全のために吸収モードで受動的に係合するように構成されている、中性子吸収材料及び中性子反射材料を含む、中性子反射体内の制御棒又は回転制御ドラムと、

30

(2) 炉心内制御棒のアレイと、

(3) 受動システムを通して前記原子炉炉心内に中性子毒を注入する非常用停止システムと、

である反応度制御システムのうちの少なくとも 1 つを備える、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 8】

さらに、前記出力変換モジュールのための冷却材及び作動流体として不活性ガスを備え、

前記冷却材は、CO₂、ヘリウム、又は、アルゴンである、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

40

【請求項 9】

前記原子炉出力モジュールと前記出力変換モジュールと前記発電モジュールとは、さらに、発電するために再生ブレイトンサイクルを行うように構成されている、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 10】

さらに、

前記原子炉出力モジュール内に完全に囲い込まれている一次ループと、

前記一次ループ内を循環する冷却材及び減速材としての水と、

前記原子炉出力モジュール内の前記一次ループと前記出力変換モジュール内の二次ループとの間の熱的結合を提供するように構成されている、1 つ又は複数の統合型分離熱

50

交換器と、

過熱水蒸気を発生させるために前記一次ループから熱エネルギーを受け取る前記二次ループ内を循環する水と、

を備え、

前記二次ループ内の水は、ランキン出力サイクルによって電気を発生させるために過熱水蒸気の形態で前記出力変換モジュール内の統合型ターボ機械に熱エネルギーを伝達し、

水蒸気は、前記ターボ機械内での膨張の後に、前記水蒸気を凝縮するために、前記出力変換モジュールの内側冷却フィン及び外側に延びる冷却フィンに熱エネルギーを受動的に伝達する統合型凝縮器に放出される、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

10

【請求項 1 1】

凝縮させられた水蒸気を再加圧して、前記統合型分離熱交換器の二次側の入口における予備冷却水を前記二次ループの中に汲み出す、1つ又は複数のポンプをさらに備える、

請求項 1 0 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 1 2】

さらに、

前記原子炉出力モジュール内に完全に囲い込まれている一次ループと、

前記一次ループ内で再循環ポンプによって能動的に循環させられる冷却材としての液体金属と、

前記原子炉出力モジュール内の前記一次ループと前記出力変換モジュール内の二次ループとの間の熱的結合を提供するように構成されている、1つ又は複数の統合型分離熱交換器と、

20

前記二次ループ内の作動流体としてのガス又は水と、

を備え、

ガスが前記作動流体として使用される時に、前記ターボ機械は、再生ブレイトン出力サイクルの要求事項を満たすように構成されており、

水が前記作動流体として使用される時に、前記ターボ機械は、ランキン出力サイクルの要求事項を満たすように構成されている

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 1 3】

30

さらに、

前記出力変換モジュール内の前記ターボ機械を形成する回転構成要素と、

前記発電モジュールの発電機 - モータを形成する回転構成要素と、

前記ターボ機械を構成する前記回転構成要素と前記発電機 - モータを形成する前記回転構成要素とが互いに共通の速度で回転するように、前記出力変換モジュール内の前記ターボ機械を形成する前記回転構成要素と、前記発電モジュールの前記発電機 - モータを形成する前記回転構成要素とを、直接的な機械的結合の形で連結する回転シャフトと、

を備え、

前記回転シャフトの回転速度は、前記出力変換モジュールの熱流体力学と、前記発電機 - モータを調整する前記制御システムの負荷条件及び設定値とによって決定され、

40

発電機出力の周波数と電氣的パラメータを統合型電子調整回路によって調整できる、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 1 4】

前記発電機 - モータは、前記可搬式原子力発電機の動作中に電気を発生させ、

前記発電機 - モータは、起動中と停止後に前記出力変換モジュールの前記ターボ機械を駆動するための電気モータとして使用することができ、

起動電力が、無停電電源装置、又は、外部の電流供給源を通して、起動中に前記発電機 - モータに供給することができる、

請求項 1 3 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 1 5】

50

淡水化、生物燃料処理、地域暖房、又は産業用途のための装置に配給される熱交換器をさらに備える、

請求項 1 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 16】

動作可能な原子炉を形成するように熱流体学的に互いに連結されるように構成されている、原子炉出力モジュールと、出力変換モジュールと、発電モジュールとを備える、可搬式原子力発電機に燃料補給する方法であって、

未使用又は使用済みの核燃料を有する第 1 の原子炉出力モジュールを取り外すことと、

前記第 1 の原子炉出力モジュールを、未使用の核燃料を有する第 2 の原子炉出力モジュールと交換することと、

を含む、

方法。

【請求項 17】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、SiCペレットの中に封入されたトリストラクチャル等方性(TRISO)の核分裂性燃料を含むモノリシック燃料エレメント(MTF)を含む、

請求項 5 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 18】

前記SiCペレットは、ナノインフィルトレーション遷移共晶相(NITE)焼結プロセスを使用して形成された構造物である、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 19】

前記MTFエレメントは、SiC又はSiC複合材料エレメントの中に封入された前記SiCペレットを含む、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 20】

前記SiCペレットはさらに、燃料含有領域を包囲する燃料非含有SiCの層を備える、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 21】

前記SiCペレットはさらに、ウラン、プルトニウム、トリウム、又は核分裂性同位体の、酸化物、炭化物、オキシカーバイド又は窒化物を含む、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 22】

前記SiCペレットはさらに、前記SiCペレットに含まれているエルビア又はガドリニアを含む可燃性毒物質である希土類酸化物を含む、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 23】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、可燃性毒物質を含む非燃料被覆粒子を含む、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 24】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、SiC繊維を含む一方向性繊維強化NITE焼結SiCの複合構造物を含む燃料エレメントを備える、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 25】

前記SiCペレットはさらに、高密度の非多孔性SiC被覆を備える、

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 26】

10

20

30

40

50

前記 M T F エLEMENT は、矩形ブロック、六角形ブロック、又は四分円プレートを備え

、
前記 M T F エLEMENT は、冷却材のための流路を提供する穴を備える

請求項 1 7 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 2 7】

さらに、炭素又は S i C を含む中性子反射体要素を備え、

前記中性子反射体要素は、前記 M T F エLEMENT の幾何学的な形状構成に一致するように幾何学的に構成されている、

請求項 2 6 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 2 8】

前記 M T F エLEMENT は、前記 M T F エLEMENT の相互間の間隙を取り除くことによって前記熱伝導性セラミック原子炉炉心の熱伝導性を増強し、且つ、炉心の受動的な熱伝達特性を増強するように、互いに近接配置されている、

請求項 2 6 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 2 9】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、前記原子炉炉心の入口及び出口に設けられている圧力プレートを備え、

前記圧力プレートは、冷却材のための流路を提供する適合した冷却材穴を備え、

前記圧力プレートは、前記原子炉炉心を圧縮状態に保つ圧縮力を提供するように構成されている、

請求項 1 7 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3 0】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、金属又はセラミックで被覆され且つバンドルの形に構成されている、酸化物、窒化物、又は金属の形態の、核分裂性材料を収容する燃料棒を備える、

請求項 1 7 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3 1】

前記バンドルは、冷却材に関連した好ましい熱伝達特性を有するように幾何学的に構成されている、

請求項 3 0 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3 2】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、球形ペブルの形態であるの疎性燃料エLEMENT を含む、

請求項 1 7 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3 3】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心は、冷却材の喪失時にさえ受動的な冷却を可能にするように構成されている、

請求項 1 7 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3 4】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、S I C - G d ^{2 0 3} 及び E r ^{2 0 3} の焼結混合物で作られている制御棒と、制御棒スリーブとを備える、

請求項 1 7 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3 5】

前記耐溶融性の熱伝導性セラミック原子炉炉心はさらに、繊維強化炭素又は S i C 複合材料で作られている制御棒チャンネルを備える、

請求項 1 7 に記載の可搬式原子力発電機。

【請求項 3 6】

前記 M T F エLEMENT は、前記可搬式原子力発電機が動的応力又は衝撃を受ける事象において、前記 S i C ペレットに亀裂が伝播することなしに、前記 M T F エLEMENT の管理された破断を可能にするための、部分的な切れ目を備える、

10

20

30

40

50

請求項 17 に記載の可搬式原子力発電機。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般的に、原子炉炉心を収容する単一の容器の中に完全に統合されている出力変換及び発電装置を備える、迅速に配備可能であり且つ回収可能である、モジュール型のコンパクト且つ輸送可能である堅牢化された原子力発電機を使用する電力及びプロセス熱の発生に関する。

【背景技術】

【0002】

原子力発電機は、当然であるが、停止後に崩壊熱エネルギーを発生させる原子炉の炉心を含む。一般的に、幾つかの要因の中で、停止後に発生させられる崩壊熱エネルギーの量が、炉心を特徴付ける燃料出力発生履歴と出力密度とに比例している。炉心内のあらゆる場所における核燃料の過熱を防止するために、崩壊熱エネルギーは、炉心を収容するように設計されている容器及び構造の外側のシステムによって一般的に支持されている冗長熱伝達機構 (redundant heat transfer mechanism) を使用して炉心から移動させられなければならない。こうした冗長冷却システム (redundant cooling system) は、炉心を収容する容器の外側に位置している熱交換器に炉心を熱流体力学的に連結する、熱エネルギーを炉心から環境 (即ち、最終ヒートシンク) に伝達するための複雑な配管ネットワークを備える。これらの熱交換器の中を通る冷却材は、電動の再循環装置 (即ち、ポンプ、プロワ) を使用して能動的に循環し、及び、冗長性は、比較的複雑な配管ネットワークの中を通して冷却材を循環又は再循環させるための弁によって調節される複数の熱交換器を使用して実現される。あるいは、代替策として、冷却材が、加熱又は冷却される時に冷却材密度が変化することに基づいた重力駆動式の自然循環機構によって、炉心と炉心外の熱交換器とを熱流体力学的に連結する、同様に複雑な配管ネットワークの中を通して受動的に循環することがある。最新の原子炉は、受動的に、能動的に、又は、両方の組合せの形で動作させられることが可能な、冗長炉心崩壊熱除去システム (redundant core decay heat removal system) に依存している。

【0003】

「能動的」安全性機構を採用する原子炉設計が、崩壊熱エネルギーを取り除くために、停止後に炉心が安全温度に維持される上で電力に大きく依存している。安全な運転と崩壊熱エネルギー除去とを常に確実なものにするために、この設計は、少なくとも2つのオフサイト送電網に対する接続によって供給される電力と、専用の冗長性オンサイト非常用ディーゼル発電機 (EDG) によって発電される非常用電力とを必要とする。

【0004】

他方では、幾つかのタイプの受動的な安全機構が、重力と、炉心に対して相対的に高い高さに配置されているタンク又は水構造物の中に一般的に貯蔵されている多量の水とにだけ依存する。炉心と冷却材貯蔵構造物の間の高さの差が、冷却材が自然循環サイホン作用を受けて炉心から崩壊熱エネルギーを効果的に取り除くために必要とされる。貯蔵された冷却材に基づいた受動的な安全機構のためには、長期的な崩壊熱除去を適切に実現する能力は、冷却材の貯蔵量と、様々な環境的温度及び湿度条件の下での重力駆動式の炉心冷却機構の有効性とに大きく依存している。一般的に、環境温度が上昇するにつれて、対流炉心冷却を受動的に生じさせる能力が漸進的に低減する。この結果として、貯蔵された冷却材の量に基づいた受動的な崩壊熱除去は、温暖な気候で運転する原子力発電機に最も適している。

【0005】

受動的及び能動的な安全システムは、一般的に、炉心を収容する容器の外側に形成されるので、冗長な配管と弁と熱交換器とポンプ/プロワと (能動的システムのための動力/電力及び制御を提供するために必要とされる) 補助電力及び制御配線ネットワークとの複

10

20

30

40

50

雑なシステムが結果的に生じることになる。炉心から熱エネルギーを除去するために専用で使用される配管と熱流体力学的装置（即ち、熱交換器）と電気装置（即ち、ポンプ）の複雑なシステムが、一般的に、「バランスオブプラント」と定義されている。大型及び小型の大半の原子力発電機のバランスオブプラントは、かなり大きいプラント設置占有面積を生じさせ、原子力発電機が配備されることが可能な敷地を限定し、及び、原子力発電機設備を特徴付ける資本コストを大きく増大させる。

【0006】

商用運転の原子炉の炉心は、一般的に、水で冷却され、及び、高温の水/水蒸気の存在下で酸化する材料で被覆された核燃料エレメントを装填されている。例えば、冷却材の喪失、又は、能動的又は受動的な炉心崩壊熱除去システムの故障のために、炉心の過熱が生じる可能性がある時に、被覆材料と水/水蒸気との間の化学反応が水素の発生を結果的に引き起こす。この時に、水素が蓄積して、最終的に自然発火し、これによって深刻な安全性の問題が生じさせられる。この結果として、原子力発電所は、例えば、発火の制御を行うために、及び、多量の水素の蓄積を防止するために、冗長な水素管理装置を備えている。しかし、この追加的な安全機構は、さらに複雑性を増加させ、運転コストを増大させ、及び、例えば、日本の福島第1原子力発電所で発生した事故のような幾つかの原子力事故によって示されているように、制御不可能である可能性がある。能動的な安全システム、受動的な安全システム、又は、これら両方の安全システムの組合せを確実なものにするために適用されるレベルの冗長性が実行され、それら安全機能は一般的に、想定設計ベース事故シナリオに基づいた確率論的リスク評価の結果である。「設計基準を越える事故（*beyond design basis accident*）」シナリオの発生の確率が非常に低いので、必ずしもすべての発生可能なシナリオが想定されているわけではない。不幸にして、炉心から環境への放射能の漏出に対する冗長性と多重設計障壁とも係わらず、安全運転に関する最新の法的規制指導に準拠した原子力発電所（即ち、福島第一原子力発電所）の場合でさえ、炉心メルトダウン、水素爆発、汚染物質侵入、及び、多量の放射性降下物がすでに発生しており、したがって、「設計基準を超える事故」シナリオによって引き起こされる事故のような壊滅的事故が、その発生の確率が非常に低いにも係わらず、安全性及び経済性に対する許容不可能な悪影響を及ぼすということを示す。「設計基準を越える事故」シナリオは、極度の地震、津波、天候関連の事象、テロリスト/敵対的な事象によって代表されるだろう。

【0007】

小型モジュール型原子炉の設計が、大型の最新の原子炉設計に比較した場合に、より小型で、モジュール型で、搬送がより容易である構成要素によって特徴付けられる。しかし、こうした構成要素又はモジュールは、最初に配備場所において熱流体力学的に（及び、電氣的に）連結されることなしには、運転できない。こうしたモジュール型構成要素を連結することは、炉心を備える容器の外側に構成されている、複雑な配管ネットワークと弁と受動的/能動的炉心冷却システム（バランスオブプラント）との相互連結によって行われる。この結果として、小型モジュール型原子炉設計に基づいた発電所の配備と設置は、小型モジュール型原子炉のサイズに関係なしに、現場の準備と、バランスオブプラント装置の設置と、全ての付属品の連結とのために、数ヶ月を要する。実際に、小型モジュール型原子炉システムが連結され終わると、その小型モジュール型原子炉設計が中庸な又は非常に低い出力定格を生じさせる場合にさえ、小型モジュール型原子炉に基づいた発電所の占有面積全体と非常時避難区域とが、依然として巨大なままである。小型モジュール型の原子炉設計は、アセンブリ終了後には搬送も回収も不可能であり、したがって、こうした小型モジュール型原子炉設計は、容易に配備されることは不可能であり、及び、幾つかの別々の潜在的に放射性である小型モジュール型原子炉構成要素の取り外しに関する一般的に長期間を要する廃止手順を伴う、モジュール型構成要素の分解とバランスオブプラントの解体にもっぱら費やされる数ヶ月間を要することなしには、用地から回収されることが不可能である。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

上述の説明から、想定設計基準の事故シナリオと設計基準を超えた事故シナリオとの結果を本質的に軽減させる仕方で、極度の環境的ストレス要因（過酷な地震事象及び洪水事象を含む）に対して安全に対処する能力を有する、あらゆる気候的条件において且つあらゆる場所において安全に運転することが可能である、プロセス熱（process heat）を提供するという選択肢を有する、適切に輸送可能であり且つ完全に動作可能であるコンパクトなモジュール型原子力発電機システムと、安全に電気エネルギーを発生させるための方法とが必要とされ続けている。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上述の説明の観点から、可搬式の堅牢化されたコンパクトなモジュール型原子力発電機が開示される。この開示される発電機は、容器外部のバランスオブプラントを必要としない統合型の出力変換及び発電装置を備え、且つ、設計基準を超えた事故シナリオと設計基準攻撃シナリオとを含むすべての事故シナリオの状況下で炉心の冷却を受動的に確実なものにする機構を備える、容器の中に収容されている原子炉炉心によって形成される。

【0010】

設置場所に特有の電氣的要求事項（及び、プロセス熱要求事項）に応じて、以下では説明を明瞭化するために「可搬式原子力発電機（transportable nuclear generator）」と呼称される可搬式の堅牢化されたコンパクトなモジュール型原子炉発電機が、様々な熱力学的出力サイクル（即ち、ブレイトン、ランキン）で動作するように構成されている統合型の出力変換装置と、設置場所に特有の電氣的要求事項に合致するように電圧及び周波数を調整する形に構成されている発電装置とを使用することによって、炉心によって発生させられる熱エネルギーを電気とプロセス熱の形に変換するために、様々な炉心構成と材料と冷却材と減速体とを用いて動作するように構成されるだろう。

【0011】

幾つかの構成では、この可搬式原子力発電機は、ガス-ブレイトンサイクル（gas-Brayton cycle）によって熱エネルギーに変換するように構成されている出力変換モジュールを用いて動作させられる時に、約45%の効率で、10MWtから40MWt（Mega-Watt-thermal）の出力定格を実現するだろう。この例示的な構成では、単一の可搬式原子力発電機は、4.5MWeから18MWe（Mega-Watt-electric）を発生させることが可能な発電ユニットを実現する。この可搬式原子力発電機は、熱伝達表面を介した自然空気循環による受動的冷却を用いて運転できるので、設置場所に特有の電氣的要求事項及び/又はプロセス熱要求事項に合致するように、複数の可搬式原子力発電機ユニットによってクラスター化されることが可能である。この可搬式原子力発電機は容易に輸送可能であり且つ回収可能なので、様々な用途に適合可能であり、及び、例えば、遠隔地、又は、送電網に接続されていない場所において、発電及びプロセス熱用途のために使用されることが可能である。付加的な用途が、様々な陸上又は人工島における産業プロセス（採鉱、石油-ガス採掘、軍事的設備）のための発電、船舶の推進のための発電、及び、重要なバルク電力送電網の連係（interconnection）における迅速送電網バックアップシステムとしての発電を含むだろう。

【0012】

1つの例示的な構成では、この可搬式原子力発電機は、3つの主要なモジュール、即ち、（1）炉心と制御システムと冷却材流反転構造（coolant flow reversing structure）とを収容する交換可能な原子炉出力モジュールと、（2）ターボ機械装置（turbo-machinery equipment）と熱交換器とを備える出力変換モジュールと、（3）高速発電機-モータと、電子コントローラと、起動動作時に使用される無停電電源装置（即ち、電池）とを備える発電モジュールとに

10

20

30

40

50

よって形成されている。封止フランジを介して熱流体力学的に連結された後に、その3つのモジュールが、熱エネルギーを周囲環境と受動的に交換する単一の堅牢化容器を形成する。出力変換モジュールのターボ機械システムを形成する回転装置が、発電モジュールの発電機 - モータ内に統合されている回転構成要素のシャフトにも機械的に連結されている単一のシャフトに機械的に連結されており、したがって、回転装置のすべてが、磁気軸受を使用して無摩擦の形で同一の速度で回転するように適合させられている。各モジュールは互いに独立的に輸送されてもよく、又は、3つのモジュールすべてが、可搬式原子力発電機が容易に操作可能であることを可能にする単一の容器の中に完全にアセンブリされてもよい。完全にアセンブリされているか、又は、別個のモジュールの形で、可搬式原子力発電機の輸送が、輸送標準規格に準拠して（即ち、標準的な輸送装置を使用して）実行されるだろう。完全にアセンブリされた形で輸送される時には、可搬式原子力発電機は、迅速に配備可能であり且つ回収可能である、完全に運転可能な発電機となる。

10

【0013】

1つの例示的な構成では、この可搬式原子力発電機モジュールは、水平方向で動作する単一の堅牢化された圧力容器を形成するように、封止及びロックフランジを使用して連結されるだろう。再方向配置された可搬式原子力発電機の外側及び内側の熱伝導フィンを含む別の構成では、その可搬式原子力発電機は垂直動作するだろう。3つのモジュールすべてが、複数の内側及び外側の構造リップを形成することによって、全体的構造を実質的に補強すると同時に内側構成要素に対する支持を提供するように構成されている、内側及び外側フィンによって形成されている、高度に統合された熱交換器を備える。ターボ機械装置と発電機 - モータ装置とに組み合わされている統合型の熱交換器が、外部のバランスオブプラントの必要なしに運転を可能にし、これによって、総合的な占有面積と、脆弱性と、冷却材喪失シナリオの確率とを大きく低減させる。この可搬式原子力発電機は、耐溶融性の伝導性セラミック炉心を含む幾つかのタイプの炉心を使用するだろう。この可搬式原子力発電機の冷却材流路は、熱エネルギーから電気エネルギーへの高効率の変換を確実なものにするように構成されている。この冷却材流路は、炉心の構造的サポートを提供する低い流体力学的抵抗を有する内側フィンを配置することと、これと同時に、伝導熱伝達機構（conduction heat transfer mechanism）によって炉心から可搬式原子力発電機の外側フィンへの崩壊熱エネルギーの伝達を確実なものにすることによって、得られる。この構成では、可搬式原子力発電機の炉心は、冷却材の完全な欠落時にさえ、その可搬式原子力発電機を取り囲む環境に対して崩壊熱エネルギーを安全且つ受動的に伝達することが可能である。次では、単一容器型の可搬式原子力発電機を形成する3つのモジュールを、さらに詳細に説明する。

20

30

【0014】

1つの構成では、原子炉出力モジュールは、濃縮核分裂性材料（即ち、ウラン又はプルトニウム）が燃料として入れられた原子炉炉心と、中性子反射体と、複数の反応度制御システムと、冷却材が効率的に原子炉出力モジュールの中を通過して循環するための流路と、原子炉出力モジュールを出力変換モジュールに連結する熱流体力学的システムとを統合する。この原子炉出力モジュールの容器がC-C複合材料又は適した金属材料で作られていることが好ましいだろう。炉心は、出力定格の要求事項を満たす材料組成と熱伝達特性とを有する任意の適切な炉心であるだろう。

40

【0015】

好ましい炉心構成が、燃料エレメントを形成するために、炭化ケイ素（SiC）の中に埋め込まれたセラミックマイクロ - カプセル封止された燃料を伴う伝導性セラミック炉心を備える。

【0016】

1つの例示的な構成では、可搬式原子力発電機は、モノリシックトリストラクチャル等方性燃料（monolithic tri-structural isotropic fueled）（MTF）エレメントを含む「耐メルトダウン性（melt-down proof）」炉心を備えている。この構成では、炉心は、SiC又はSiC複合材料

50

エレメントの中に封入された完全セラミックマイクロカプセル封止 (fully ceramic micro-encapsulated) (FCM) 燃料と以下では呼称される SiC ペレット内の TRISO 燃料によって、又は、MTF エレメント内に分散したトリストラクチャル等方性 (tri-structural isotropic) (TRISO) 粒子によって製造された燃料エレメントで作られている。任意の焼結、圧縮、又は、他の SiC 製造プロセスが、ペレット及び/又はブロックの形の適切な構造的強度と放射線照射耐性とを有する SiC を生じさせるために、使用されるだろう。1つの好ましい構成では、ナノインフィルトレーション遷移共晶相 (nano-infiltration and transient eutectic-phase) (NITE) 焼結プロセスが使用されるだろう。ペレットは、燃料含有領域を包囲するための燃料非含有 SiC の層を有するだろう。

10

【0017】

TRISO 粒子中で使用される核分裂性燃料は、ウラン、プルトニウム、トリウム、又は他の核分裂性同位体の、酸化物、炭化物、オキシカーバイド、又は窒化物であるだろう。エルビア又はガドリニアのような可燃性の毒物質 (poison) である希土類酸化物が SiC セラミック成形体中に含まれることがある。この可燃性の毒物質は、さらに、ペレットを形成する燃料粒子と混合されている特別な被覆粒子の中に含まれることがある。TRISO 粒子の高密度の非多孔性 SiC 被覆と、FCM 燃料ペレットの高密度 SiC マトリックスと、燃料エレメント中の SiC とが、放射線抵抗性で熱伝導性であり且つ高温で運転に適合可能である形態の、核分裂性生成物の移動と分散とに対する多重障壁を実現する。

20

【0018】

別の例では、可搬式原子力発電機は熱伝導性のセラミック炉心を装填されることがあり、この伝導性セラミック炉心は、MTF エレメント又はブロックと、同様に形成されている反射体エレメント又はブロック (例えば、炭素又は SiC 複合材料で作られている) とによって構成されている。この構成では、MTF は、運転中の過剰な熱応力を回避するように設計され寸法決定されている。一例が、図 24 と図 24A とに示されている四分円形の厚さ 10 cm のプレートである。他の例が六角形又は矩形の燃料ブロックである。全ての構成において、燃料と、反射体ブロック又はエレメントは、冷却材が流れるための穴を含む。全ての構成において、適合した冷却材穴を有する圧力プレートが、炉心を常に圧縮状態に保つために、炉心の入口と出口とに含まれるだろう。伝導性セラミック炉心マトリックスの熱伝導性も、燃料成形体及びブロックの相互間の間隙を排除することと、ブロック間の間隙を減少させることとによって増強され、これによって、燃料温度を低下させ、及び、すべての事故シナリオの状況下において可搬式原子力発電機の炉心の受動的な熱伝導能力を実現する。

30

【0019】

炉心の反応度は、反射体内で中性子を吸収して中性子が炉心に再び入ることを防止することによって、及び、炉心中性子を吸収することによって、抑制されるだろう。可搬式原子力発電機の炉心の反応度は、(1) 安全のために吸収モードで受動的に係合するように配置されている中性子吸収材料及び中性子反射材料を含む反射体内の制御棒又は回転制御ドラムと、(2) 炉心内制御棒のアレイ (array) と、(3) 他のシステムが故障した場合に受動システムを通して炉心内に中性子毒を注入する非常用停止システムとを動作させることによって抑制される。制御ドラムは、制御ドラムの回転位置に応じて幾らかの中性子が脱出するか又は反射されて炉心の中に戻されることを可能にするように幾何学的に配置されている吸収材料及び反射材料を備える。中性子吸収材料は、ホウ素又は希土類の中性子捕捉材料を伴う SiC 主成分又は C 主成分のセラミックであるだろうし、一方、中性子反射体部分は、好適な中性子反射特性を有する、適切な高温適合性の形態の、ベリリウム又は他の材料を使用するだろう。これらの反応度抑制機構が互いに独立的に動作するだろうし、及び、各々が、出力を調整しかつ原子炉停止を実現するように、炉心の反応度の完全な又は部分的な制御を行うことが可能だろう。

40

50

【0020】

金属又はセラミックで被覆され、且つ、冷却材媒質に適しているようにバンドルの形に構成されている、酸化物、窒化物、金属等の形態の核分裂性材料を含む燃料棒のような、他の原子炉炉心構成が使用されることがある。球形ペブル(spherical pebble)のような適切な幾何学的形状の疎性(loose)の燃料エレメントが、使用されることもある。

【0021】

1つの構成では、可搬式原子力発電機の炉心は、出力変換モジュールのための冷却材及び作動流体として不活性ガスを使用する。この構成では、冷却材は、CO₂、ヘリウム、又は、他の好適な不活性ガス(例えば、アルゴン)であることが可能である。この例では、可搬式原子力発電機炉心が熱エネルギーを発生させ、一方、様々な統合型熱交換器と組み合わせられたターボ機械が、再生ブレイトンサイクル(regenerative Brayton cycle)を行うことに寄与し、高い出力変換効率を実現する。

10

【0022】

別の構成では、可搬式原子力発電機炉心は、冷却材として、及び、部分的には、原子炉出力モジュール内に完全に囲い込まれている一次ループ内を循環する減速材として、水を使用する。一次ループ内の圧力が、統合型の加圧器を使用して調節される。1つ又は複数の統合型の分離熱交換器(separation heat exchanger)が、原子炉出力モジュール内の一次ループと出力変換モジュール内の二次ループとの間の熱結合を実現する。二次ループ内を循環する水は、熱流体力学的状態を予備冷却液体(sub-cooled liquid)から過熱水蒸気(super-heated steam)に変化させるように、分離熱交換器(即ち、蒸気発生装置)の一次ループ側から熱エネルギーを受け取る。二次ループ内の水は、一次ループ内を循環する水と混合しない。この構成では、可搬式原子力発電機炉心の熱エネルギーは、過熱水蒸気の形で出力変換モジュール内のターボ機械に伝達される。水蒸気は、ターボ機械内で膨張した後に、統合型凝縮器に送られ、この統合型凝縮器は、熱エネルギーを出力変換モジュールの内側冷却フィンと外側に延びる冷却フィンに受動的に移動させる。水蒸気が凝縮するにつれて、この水蒸気は1組のポンプによって再加圧され、及び、二次ループが、分離熱交換器の二次側の入口において予備冷却液体を汲み出すことによってリセットされる。

20

【0023】

別の構成では、可搬式原子力発電機の一次ループは、1つ又は複数の分離熱交換器の二次側に対する熱エネルギー伝達のために、再循環ポンプを使用して能動的に循環させられるか又は受動的に循環させられる液体金属を備えるだろう。この可搬式原子力発電機の炉心構成では、二次側は、作動流体としてガスを用いる再生ブレイトン出力サイクルの要求事項に適合するように設計されているターボ機械を使用する出力変換モジュール、又は、作動流体としての水を用いるランキン出力サイクル(Rankine power cycle)の要求事項に適合するように設計されているターボ機械と凝縮器とを使用する出力変換モジュールに連結されるだろう。

30

【0024】

出力変換モジュールの構成とは無関係に、ブレイトン出力サイクル又はランキン出力サイクルの要求事項に適合するように設計されている構成要素を使用する時に、出力変換モジュールは、出力変換モジュール内のターボ機械を形成する回転構成要素として、発電モジュールに直接的に連結されており、及び、発電モジュールの発電機-モータを形成する回転構成要素が、同一の速度で回転するように回転シャフトに直接的に機械的に連結されている。このシャフトの回転速度は、出力変換システムの熱流体力学的な特性と、装填条件と、発電機-モータ機械を調節する電子制御システムの設定とによって決定される。発電機出力の周波数と他の電気的パラメータは、統合型の電子調整回路によって制御されるだろう。

40

【0025】

1つの構成では、発電モジュール内の発電装置は、起動中と停止後に出力変換モジュール

50

ルのターボ機械を駆動するための電気モータとして動作するように切り換えられるだろう。この構成では、起動電力は、1組の電池（即ち、無停電電源装置装置）、又は、外部電力供給源（例えば、小型ディーゼル電源）によって供給されるだろう。

【0026】

大多数の構成では、出力変換モジュールと発電モジュールとに統合されているすべての回転構成要素を連結するシャフトは、磁気軸受を使用して、対応するモジュールの不動構造に連結されているだろう。全てのモジュールの完全な分離と独立性とを確実なものにするために、出力変換モジュールと発電モジュールは、連結時に、シャフトを機械的に連結するための可とう性カップリングを使用する。

【0027】

他の構成では、発電モジュールの回転構成要素が出力変換モジュールの回転構成要素から係合解除されることが必要とされる場合に、又は、特定の用途において、これら2つのモジュールの回転要素の相互間で異なる回転速度が必要される場合に、クラッチが想定されることがある。

【0028】

全ての構成において（即ち、冷却材及び/又は作動流体としてガス又は液体を使用する構成）において、この可搬式原子力発電機は、迅速に配備可能であり且つ回収可能である非常にコンパクトな可搬式の発電ユニットを提供するための、高度の構成要素レベルのモジュール性と統合とを実現する。この可搬式原子力発電機は、連結時に単一の容器を形成する3つの事前構成済みのモジュールを特徴とする。各々のモジュールは、大量生産が可能であり、個別的に又はアセンブリ完成状態において容易に搬送可能であり、及び、運転可能である。燃料補給サイクルの完了時に、又は、非常事態のために、例えば空輸（例えば、C17輸送機、又は、重量物吊り下げヘリコプタによる輸送）による、炉心の迅速な回収が必要となる場合に、原子炉出力モジュールがホットスワップされることが可能である。

【0029】

その3つのモジュールを形成する可搬式原子力発電機の構成要素は、既存の技術（様々な商業的用途からのターボ機械、及び、磁気軸受を伴う高速オルタネータ - モータ技術からの発電機 - モータ）、又は、様々な国立研究所において及び国際的に開発され試験された成熟した技術（例えば、FCM燃料）に依存している。原子炉出力モジュールは、原子炉炉心を収容し、支持し、保護し、且つ、冷却し、出力変換モジュールは、ターボ機械（ガス冷却可搬式原子力発電機構成のためのタービンと圧縮機装置）と、選択された冷却材と熱力学的出力サイクル（即ち、再生的又は部分的なブレイトン又はランキン）とに適合化されている統合型熱交換器（即ち、回収熱交換器と予冷器と中間冷却器）とを備え、及び、発電モジュールは発電装置ユニットを含む。

【0030】

完全にアセンブリされた可搬式原子力発電機は、最少限の用地の準備によって水平方向で稼働するように、又は、地下設置のために垂直方向で稼働するように、構成されるだろう。全ての構成において、この可搬式原子力発電機は、迅速なフィールドイング（fielding）とスタートアップ（start up）と、原子炉全体又は個別的なモジュールの迅速な回収とを可能にする。燃料補給は、使用済みの炉心を収容する「使用済み」原子炉出力モジュールを、未使用の炉心を収容する新しいモジュールと交換することによって行われるだろう。出力変換モジュール又は発電モジュールにおいて故障が生じる場合には、こうしたモジュールの交換が、故障しているモジュールを新しいモジュール又は工場再生モジュールと単純に交換することによって行われるだろう。

【0031】

選択された作動流体によっては、可搬式原子力発電機は、全ての小型のモジュール型原子炉設計のバランスオブプラントを一般的に形成する配管と装置の複雑なネットワークを必要とはしないことがある。この可搬式原子力発電機は、完全に統合されており、及び、配備の直後に発電する準備が整っている。この可搬式原子力発電機が水平運転用に構成さ

10

20

30

40

50

れている場合には、その結果としての発電機は、地震活動によって特徴付けられる設置場所、船舶内、及び、クリティカルな電力を必要とする幾つかの他の用途における容易な配備を可能にする。原子炉出力モジュールと出力変換モジュールと発電モジュールは、民間及び軍用の輸送標準規格に準拠した様々な輸送オプションを伴う形で、標準化された輸送プラットフォームと運転プラットフォームと貯蔵プラットフォームとの上に、互いに個別的に且つ独立的に固定されるように設計されるだろう。

【0032】

この可搬式原子力発電機は、その受動的冷却のために多量の水を必要とすることはなく、及び、その最終ヒートシンクとして、局所的な水、又は、乾燥した非蒸発性の空気、又は、単純な環境空気を利用するだろう。オフノーマル(off-normal)な状況では、この可搬式原子力発電機は、(炉心冷却材の完全喪失状態における)炉心からフィン付きモジュール壁への伝導熱伝達による受動的な崩壊熱エネルギー除去と、その可搬式原子力発電機を包囲する大気への受動的な対流熱伝達とにだけ依存することが可能だろう。原子炉出力モジュールは、燃料補給のために可搬式原子力発電機の他の部分から分離させられている時には、放射及び周囲空気対流機構だけに基づいた受動的な崩壊熱除去が可能である。

10

【0033】

この可搬式原子力発電機が、ブレイトンサイクル変換に基づいた出力変換モジュールを用いて動作するように構成されている場合には、この可搬式原子力発電機は、様々なプロセス熱用途に適合するように使用されることが可能な高温度の廃熱を利用するという選択肢を提供する。この構成では、可搬式原子力発電機は、淡水化、生物燃料処理、地域暖房、又は、他の産業用途のための装置に配給される低品質及び/又は高品質のプロセス熱の生産のための熱交換器を備えることもある。

20

【0034】

発電モジュールは、統合型の電池パック(即ち、発電モジュールと共に含まれている)又は小型の外部ディーゼル発電機によって実現される、無停電電源装置の補助によって可搬式原子力発電機の一次ループを加熱及び加圧すると同時に、ターボ機械を起動するように構成されることがある。完全にアセンブリされた可搬式原子力発電機ユニットは、起動と停止と通常運転を行うことが可能であると同時に、過渡状態(transient)と緊急事態とにおいて安全燃料温度マージンを受動的に維持することが可能な発電プラントを実現する。

30

【0035】

本発明の他の装置と機器とシステムと方法と特徴要素と利点とが、以下の添付図面と詳細な説明を理解することによって、当業者にとって明らかであり、及び、明らかになるだろう。全てのこうした付加的なシステムと方法と特徴要素と利点とが、この説明の範囲内と、本発明の範囲内とに含まれ、及び、添付されている特許請求項によって保護されることが意図されている。

【0036】

本発明は、以下の図面を参照することによってより適切に理解されることが可能である。図面の構成要素は、必ずしも全て同一の縮尺で描かれているわけではなく、発明の原理を例示する際に強調が行われている。これらの図では、参照番号は、様々な図のすべてにおいて、一致する部品を示している。

40

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図1】例示的な実施形態の原子炉出力モジュールと出力変換モジュールと発電モジュールの境界を示す、例示的な可搬式原子力発電機のブロック図の上方斜視断面図である。

【図2】可搬式原子力発電機の水平的運転又は垂直的運転のためのすべての装置を備える単一の容器を示す、例示的な可搬式原子力発電機のブロック図の上方斜視断面図である。

【図3】受動冷却機能と構造的堅牢化機能と遮蔽機能のための強化熱伝導区域を提供するように開発されている外側の可搬式原子力発電機フィンを示す、図1に示されている例示

50

的な実施形態の側面図である。

【図4】図1に示されている可搬式原子力発電機の例示的な実施形態のガス冷却構成の断面図である。

【図5】図1に示されている可搬式原子力発電機の例示的な実施形態のガス冷却構成の機能図である。

【図6】図1の可搬式原子力発電機の一変型の例示的な実施形態の内部の詳細断面説明図である。

【図7】図1と図6に示されている可搬式原子力発電機の原子炉出力モジュールの例示的な実施形態の断面斜視図である。

【図8】可搬式原子力発電機の原子炉出力モジュールの一例としての、頂部炉心反射体を伴わない、原子炉出力モジュールの斜視図である。

10

【図9】可搬式原子力発電機の原子炉出力モジュールの一例としての、頂部炉心反射体を伴う、原子炉出力モジュールの斜視図である。

【図10】図6に示されている出力変換モジュールに含まれている「回収熱交換器」として機能する低背圧統合型熱交換器の例示的な実施形態の斜視図である。

【図10A】図6に示されている出力変換モジュールに含まれている「回収熱交換器」として機能する低背圧統合型熱交換器の例示的な実施形態の斜視図である。

【図10B】図6に示されている出力変換モジュールに含まれている「回収熱交換器」として機能する低背圧統合型熱交換器の例示的な実施形態の斜視図である。

【図11】ターボ機械を出て行く作動流体と、図6に図示されており且つ図10と図10Aと図10Bとに示されている圧縮機から戻る流体との間の分離を実現する、低背圧統合型熱交換器の完全にアセンブリされた例示的な構成の斜視図である。

20

【図12】図1と図6に示されている可搬式原子力発電機の例示的な実施形態の流体の膨張のためのターボ機械の放出において、浪費されることがある熱エネルギーを回収する機能を果たすための、図10に示されている熱交換器の入口に入る流体と、出力変換モジュールの中間冷却器部分から戻る流体との間の、別々の流動パターンによって生じさせられる熱伝達を示す、図11に示されている完全にアセンブリされた低背圧統合型熱交換器の例示的な実施形態の斜視図である。

【図13】輸送又は貯蔵の準備における原子炉出力モジュールのホットスワッピングと封止とを実行するための、遠隔的な水力式の高温原子炉出力モジュールのための装置の例示的な実施形態の斜視図である。

30

【図14】完全にアセンブリされた可搬式原子力発電機から原子炉出力モジュールを切り離して、原子炉出力モジュール（炉心）の交換のための遠隔油圧式モジュール切り離し及び封止を行うようになっているか、又は、出力変換モジュールの一方の側でメンテナンスを行うようになっている、例示的なシーケンスを示す斜視図である。

【図15】完全にアセンブリされた可搬式原子力発電機から原子炉出力モジュールを切り離して、原子炉出力モジュール（炉心）の交換のための遠隔油圧式モジュール切り離し及び封止を行うようになっているか、又は、出力変換モジュールの一方の側でメンテナンスを行うようになっている、例示的なシーケンスを示す斜視図である。

【図16】輸送標準規格に準拠しており、輸送及び運転中にそのモジュールを固定することを可能にし、及び、配備場所における重量物持ち上げクレーンの必要なしに迅速な連結及び切り離しのためにモジュールを滑動させることを可能にするガイドを備えている、例示的な輸送可搬式原子力発電機プラットフォームを示す斜視図である。

40

【図17】（停止直後の短時間内の）迅速な原子炉出力モジュールのホット回収（hot retrieval）を行うための、追加された遮蔽構造及び受動冷却構造を伴う、図16に示されている例示的な輸送可搬式原子力発電機プラットフォームを示す斜視図である。

【図18】図1に示されている例示的な可搬式原子力発電機のブロック図の変更された一変型の頂部断面図であり、この図では、可搬式原子力発電機の水平（又は垂直）運転のための装置のすべてを備える単一の容器が、少なくとも1つの分離熱交換器によって分離さ

50

れる一次ループと二次ループを使用するランキン出力サイクルの冷却材及び作動流体として水を用いて動作するように構成されている。可搬式原子力発電機のこの構成は、さらに、分離熱交換器によって出力変換モジュールから分離されており、且つ、ブレイトン又はランキン出力サイクルの使用を可能にする、液体金属冷却原子炉出力モジュールに対しても適用される。

【図 19】図 18 に示されている例示的な可搬式原子力発電機ブロック図の平面図である。

【図 20】図 18 に示されている例示的な可搬式原子力発電機ブロック図の機能図である。

【図 21】図 18 に示されている可搬式原子力発電機の一変型の例示的な実施形態の内部の詳細な断面模式図である。

【図 22】迅速な配備のための標準的な輸送プラットフォーム上に固定されており且つ任意の配備場所において発電する準備が整っている、例示的な完全にアセンブリされた可搬式原子力発電機のスケール表示 (scale indication) を示す斜視図である。

【図 23】ホット炉心取り外しシナリオの状況下での放射性遮蔽を確実なものにするための付加的な受動冷却特徴要素と膨張可能なシールドとを伴う形でこの図では示されている、迅速「ホット」原子炉出力モジュール輸送 (即ち、緊急現場抜き取り) のための、標準的な輸送プラットフォーム上に固定されている、可搬式原子力発電機の例示的な原子炉出力モジュールの斜視図である。

【図 23A】ホット炉心取り外しシナリオの状況下での放射性遮蔽を確実なものにするための付加的な受動冷却特徴要素と膨張可能なシールドとを伴う形でこの図では示されている、迅速「ホット」原子炉出力モジュール輸送 (即ち、緊急現場抜き取り) のための、標準的な輸送プラットフォーム上に固定されている、可搬式原子力発電機の例示的な原子炉出力モジュールの斜視図である。

【図 24】冷却材の完全喪失の場合でさえも受動的に冷却されることが可能な耐溶解性の炉心を形成する、優先的な伝導性セラミック炉心要素と完全セラミックマイクロカプセル封止燃料エレメントの斜視図である。

【図 24A】冷却材の完全喪失の場合でさえも受動的に冷却されることが可能な耐溶解性の炉心を形成する、優先的な伝導性セラミック炉心要素と完全セラミックマイクロカプセル封止燃料エレメントの斜視図である。

【発明を実施するための形態】

【0038】

本明細書に開示されている可搬式原子力発電機の例示的な構成が、電気エネルギーとプロセス熱とを必要とする様々な用途のための、安全であり、且つ、迅速に搬送と運転とが可能である、原子力発電機システムの提供に関連して説明される。当業者は、高い運転コストと汚染物質の放出とを伴うディーゼル発電機を使用すること以外におそらくは他の選択肢がない場所において、信頼性が高く且つ連続的な電力を必要とする任意の電力要求用途のために、可搬式原子力発電機の統合型モジュールが構成される可能性があることを理解するだろう。この可搬式原子力発電機は、可搬式原子力発電機の内部から環境 (最終ヒートシンク) への受動的な熱伝達機構を強化するために、様々なフィン形状を有するように構成されるだろう。

【0039】

図 1 は、例示的な実施形態の原子炉出力モジュール 200 と、出力変換モジュール 300 と、発電モジュール 400 との境界を示す、例示的な可搬式原子力発電機 100 のブロック図の上方斜視断面図である。図 2 は、3つのモジュール (原子炉出力モジュールと、出力変換モジュールと、発電モジュール) を連結することと、水平運転又は垂直運転のための統合型装置すべてを備えることとによって形成されている、単一容器の可搬式原子力発電機 100 を示す、例示的な可搬式原子力発電機のブロック図の上方斜視断面図である。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 0 】

図3は、原子炉出力モジュール上の外側フィン208と、出力変換モジュール上の外側フィン208、208Aと、発電モジュール上の外側フィン208とを備える各モジュールを示す、図1に示されている例示的な実施形態の側面図である。フィン208、208Aは、可搬式原子力発電機100の受動的冷却機能と構造的堅牢化機能と遮蔽機能とのための強化された熱伝導区域を提供するように形成されている。

【 0 0 4 1 】

図1と図2を参照すると、可搬式原子力発電機100が3つの主モジュールによって形成されている。交換可能な原子炉出力モジュール200が、炉心203と、制御及び炉心停止システム204と、炉心制御及び反射体システム205と、冷却材流反転構造206（図7に詳細に示されている）と、受動的炉心熱伝達構造207とを収容する。原子炉出力モジュールは、封止及び支持フランジ201によって出力変換モジュール300に連結されている。出力変換モジュール300は、封止フランジ301を使用して原子炉出力モジュールに封止されており、及び、ターボ機械装置304と、低背圧熱交換器「回収熱交換器」305と、「予冷器」306と、「中間冷却器」307と、流れ反転構造309（206と同様）と、出力変換モジュール300と発電モジュール400とのすべての回転構成要素に機械的に連結されているシャフト310とを備える。出力変換モジュール300は、フランジ301を使用して発電モジュール400に封止され且つ連結されている。発電モジュール400は、封止フランジ401を使用して出力変換モジュール300に封止されており、及び、埋め込まれた電子コントローラを有する高速発電機 - モータ402と、起動動作中に使用される無停電電源装置403（即ち、電池）と、発電機統合型冷却システム/熱交換器404と、ターボ機械304の回転シャフトと機械的に連結するためのインターフェーシング（interfacing）及び可とう性連結構造を有する封止磁気軸受405とを備える。その3つのモジュールは、封止フランジ201 - 301、301 - 401によって熱流体力学的に連結されると、フィン208、208Aを使用して周囲環境と熱エネルギーを受動的に交換する単一の堅牢化された容器100を形成する。フィン208と延長フィン208Aは、可搬式原子力発電機100の外部環境に対するモジュール内部からの熱エネルギー伝達を確実なものにするための熱伝達機能を実現することに加えて、さらに構造的堅牢化機能と遮蔽機能とを有する。原子炉出力モジュール200内の仕切り壁209によって形成される圧力バウンダリが、制御システム204、205を収容するチャンバ210によって示される第2の圧力バウンダリと共に、一次圧力バウンダリ311によって示される、環境の異なる冷却材及び分離を可能にする。同様に、発電モジュール400内の仕切り壁406は、出力変換モジュール300の内側に相当する環境311からの発電機 - モータ環境407の封止と分離とを可能にする。出力変換モジュール300のターボ機械システム304を形成する回転装置が、発電モジュール400の発電機 - モータ402内に統合されている回転構成要素のシャフトにも機械的に連結されている単一のシャフト310に機械的に連結されており、したがって、回転装置のすべてが、（ターボ機械システム301と発電機モータ402の一方の側にだけ示されている）無摩擦式の磁気軸受405を使用して同一速度で回転するように適合させられている。

【 0 0 4 2 】

各モジュールは互いに独立的に輸送されてもよく、又は、3つすべてが完全にアセンブリされて、完全に運転可能な可搬式原子力発電機容器100を形成してもよい。すべてのモジュールが、圧力及び配線取り付けポート211を通して連結されている。これらのポートは、冷却材の交換又は放出作業と、様々な電氣的機能の監視及び制御（即ち、制御棒の駆動又は回転の制御、及び、反射体機構）とを可能にする。さらに、取り付けポート211は、配備場所において送電網に対する発電機 - モータ402からの電気バス接続を可能にする。

【 0 0 4 3 】

可搬式原子力発電機100の完全アセンブリされたモジュール又は別々のモジュール形

10

20

30

40

50

での輸送が、輸送標準規格に準拠して（即ち、標準的な輸送装置を使用して）実行されるだろう。完全にアセンブリされた状態で輸送される時には、その可搬式原子力発電機 100 は、迅速に配備可能であり且つ回収可能である、完全に運転可能な発電機となる。

【0044】

1つの構成では、各モジュールに相当する圧力容器を形成する材料は、反射体として、及び、さらには、圧力バウンダリ（圧力容器）として、炭素と炭化ケイ素の複合構造を使用するだろう。軽量の低中性子吸収容器の使用が、小型炉心 203（図1）の中性子節約（neutron economy）を向上させるために中性子反射の外部機構を使用するという選択肢を可能にする。

【0045】

図1に示されている1つの例示的な構成では、可搬式原子力発電機モジュールは、水平方向で動作する単一の堅牢化された可搬式原子力発電機の圧力容器 100 を形成するために、封止及び固着フランジ 201 - 301 及び 301 - 401 を使用して連結されるだろう。例えば図2に示されている別の構成では、可搬式原子力発電機 100 の外部の熱伝達フィン 208B、208C、208D を再方向配置することによって、その可搬式原子力発電機が、垂直方向で運転するように構成されるだろう。すべてのモジュールは、例えば図1と図2に示されているような、内側フィン 212、207、305、306、307、404 によって形成されている高度に統合された熱交換器を備える。これらの統合的な熱交換器は、可搬式原子力発電機 100 の垂直方向での運転又は地下施設内での運転のために再方向配置される時に、図1の外側フィン 208、208A と、フィン 208B、208C、208D（図2）とに熱的に結合させられる。各モジュールのすべての内側フィンは、内部構成要素に対する支持を提供し、これと同時に、これらの内側フィンが多重構造リブを形成するので可搬式原子力発電機構造全体を著しく補強し、したがって、可搬式原子力発電機 100 の容器全体を堅牢化し、及び、冷却材流路として。

【0046】

1つの構成では、可搬式原子力発電機 100 の原子炉制御機構が、炉心 203 の領域に対して中性子吸収材料 216 を挿入／引出するように構成されている制御駆動機構 204 に加えて、及び、炉心 203 に対して実質的に中央に位置する領域内に中性子吸収材料を挿入するように構成されている中央制御棒駆動機構 219 に加えて、中性子反射体 214 の領域内での中性子吸収材料 215 の挿入／引出によってその中性子吸収材料 215 を制御するように構成されている、例えば図4に示されている、制御駆動機構 205 を備えるだろう。

【0047】

別の構成では、可搬式原子力発電機 100 の原子炉制御機構が、炉心 203 の領域内に対して中性子吸収材料 216 を挿入／引出するように構成されている制御駆動機構 204 に加えて、及び、炉心 203 の実質的に中央に位置する場所に対して中性子吸収材料 220 を挿入／引出するように構成されている中央制御棒駆動機構 219 に加えて、中性子反射体 214 の領域内での中性子吸収材料 215 の挿入／引出によってその中性子吸収材料 215 を制御するように構成されている制御駆動機構 221（図6）を備えるだろう。

【0048】

図7に示されている別の構成では、可搬式原子力発電機 100 の原子炉は、回転ドラム各々の一方の側に中性子吸収材料を含み、且つ、その反対側に中性子拡散材料（反射体）を含む、回転ドラム 213 を含む原子炉制御機構を備える、原子炉出力モジュール 200 を使用するように構成されることがある。この回転ドラム 213 は、中性子吸収材料が炉心 203 に対面して炉心 203 の臨界未満状態を強制する形で回転ドラム 213 を回転させることによって、回転ドラムを受動的に常に位置決定する磁気継手を備える。電磁制御手段（即ち、この図7には示されていない、ソレノイド操作、電磁的操作、モータ補助式操作、又は、油圧式操作）を使用して、回転制御ドラム 213 が回転させられる時に、この回転ドラムは、炉心 203 に対して中性子反射性箇所を露出させ、これによってその臨界状態を増大させる。電力喪失時には、回転制御ドラムは、常に、中性子吸収側が炉心 2

10

20

30

40

50

03に対面するように受動的にその回転制御ドラム自体を位置決定し、これによって停止状態を強制的に生じさせる。この構成は、例えば敵対的な事象によって生じさせられた爆発の結果として可搬式原子力発電機容器100がその支持プラットフォームから外されて回転させられる場合にさえ、有効状態のままである。

【0049】

図5と図6と図8と図9と図21とに示されているように、冷却材流方向に関して、炉心203の入口部分と出口部分は、それぞれに中性子反射体217、218に対面されている。さらに、原子炉出力モジュールは、すべての他の制御システムが故障する場合に、受動的システムによって炉心内に中性子毒を注入する緊急停止システムを備える。

【0050】

原子炉制御を取り扱う諸側面を要約すると、1つの構成においては、炉心203に対する反応度制御が、安全のために吸収モードで能動的に使用されるように配置されている吸収及び反射材料を含む、反射体214内の制御棒215によって、及び、複数の炉心内制御棒216を駆動することによって、行われるだろう。別の構成では、炉心203に対する反応度制御が、炉心203の追加的な独立した停止機構を提供するために、非常時の中性子毒注入に加えて、炉心内制御棒216、中央制御棒220、回転制御ドラム213、又は、これらの構成の組合せを駆動することによって行われるだろう。制御棒材料は、ホウ素、又は希土類吸収材料、及び、反射体材料としてのベリリウムを伴う、SiCが主成分のセラミック又はCが主成分のセラミックであるだろう。

【0051】

図1を参照すると、原子炉出力モジュール200内の統合型熱交換器212が、制御棒駆動機構204、205に対して受動的冷却を提供するように構成されているだろう。図1と図2と図5を参照すると、統合型熱交換器207は、内部炉心203と、原子炉出力モジュール200の外側フィン208(図1及び図3)又は208B(図2)との間の伝導熱伝達によって崩壊熱を炉心203から受動的に取り除くように構成されているだろう。統合型熱交換器207は、冷却材完全喪失シナリオの状況下においてさえ、炉心203から崩壊熱エネルギーを伝達するように構成されているだろう。幾つかの構成では、炉心203は、例えば図7に示されている、高度に熱伝導性である経路207を形成する材料に熱的に結合されている燃料エレメントによって形成されているだろう。図4と図5を参照すると、出力変換モジュール300は1組の統合型熱交換器を備える。これらの統合型熱交換器は、ブレイトン出力サイクルの熱力学的構成に合致した形で、回収熱交換器305と予冷器306と中間冷却器307として機能するように構成されているだろう。専用モジュールに完全に統合されている追加の統合型熱交換器が、発電モジュール400に統合されている発電機-モータ統合熱交換器404によって表されている。

【0052】

図1、2、3、4、5の単一の容器100の形に統合されている可搬式原子力発電機の1つの好ましい構成では、出力変換モジュール300が、原子炉出力モジュール200内で発生させられた熱を回転シャフト310に結合された機械的出力に変換するための、ターボ機械システム304と統合型熱交換器ハードウェアとを収容する。同じシャフト310上に回転ターボ機械を結合するために、及び、出力変換モジュール300によって表されるエンクロージャ内において、ガス312(図5)が適正な熱物理的特性を有する作動流体であるということを前提として、原子炉出力モジュール内の炉心203を通過して流れることによって生じさせられる高温ガス312がガスタービン304Aの中に入る。

【0053】

図5と図6を参照すると、タービン304Aの個々の段における膨張の後に、ガスが、圧縮機304Bの低圧力側と圧縮機304Cの高圧力側とに入る前に、回収熱交換器305として定義されている統合型熱交換器と予冷器306との中に入り、このガスは、低抵抗流れ反転構造(low-drag flow reversing structure)206(図1)を使用して流れの方向を反転する前に統合型中間冷却器熱交換器307の中を流れて、回収熱交換器305の高温側を流れ、最終的に、原子炉出力モジュ

10

20

30

40

50

ール200内の炉心203の低温側に入ることによってブレイトンガスサイクルをリセットする。予冷器306と中間冷却器305は、フィン208と延長フィン208A(図3)とによって最終ヒートシンクに残留廃熱を受動的に伝達する、「ガス-空気」又は「ガス-液体」熱交換器として構成されるだろう。この構成では、原子炉冷却ガス312とブレイトン作動ガス312は同一であるだろう。ガス312は、CO₂、ヘリウム、アルゴン、又は、熱力学的要求事項及び炉心要求事項を満たす熱物理学的特性を有する別の流体であるだろう。

【0054】

再生ブレイトンサイクル構成では、可搬式原子力発電機の出力変換効率は約45%であるだろう。バイパス弁313が、炉心を出て行くガス312を基本的にショートカットさせることによって、電氣的要求にしたがった負荷追従の実現を可能にする。

10

【0055】

シャフト310が、発電モジュール400と、出力変換モジュール300内のターボ圧縮機とに機械的に連結されているので、発電機-モータ402は、発電機をモータに変換するために、且つ、起動時と停止時にガス循環装置システムとして機能するターボ機械のための駆動装置としてモータ402を使用するために、無停電電源装置ユニット403に統合されている電池を使用するように、起動動作のために構成されているだろう。

【0056】

1つの構成では、シャフト310が、可搬式原子力発電機の制御システム内の突発的な電力喪失、電子コントローラの故障、又は、電磁軸受コイルの故障の場合に係合するキャッチャー軸受(catcher bearing)を有する磁気軸受405を使用して、出力変換モジュールと発電モジュールの不動要素に連結されているだろう。出力変換モジュールが発電モジュールから分離させられる(即ち、個別的なモジュール輸送中に)ことを可能にするために、シャフト310は、モジュール連結フランジ301-401の場所において可とう性の高速連結器によって連結されている2つの別々のシャフトによって形成されているだろう。統合型のターボ機械及び発電機-モータ装置が、外部のバランスオブプラントの必要なしに動作することを可能にし、これによって、総合的な設置占有面積と、脆弱性と、冷却材喪失シナリオの発生確率を著しく低減させる。

20

【0057】

図7と図8と図9を参照すると、原子炉出力モジュール200は、耐溶融性の伝導性セラミック炉心を含む幾つかのタイプの炉心203を使用するだろう。

30

【0058】

図7に示されている1つの例示的な構成では、炉心203は、様々な形状を有する燃料エレメント221によって形成されている。燃料エレメント221は、冷却材が冷却材流路222内を循環すると同時に、その冷却材に伝達される熱エネルギーの高効率な変換を確実なものにするために、冷却材流路222を備えるように構成されているだろう。冷却材流路222は、流体が燃料エレメント221の中を流れて流れることを可能にするように、及び/又は、制御機構が炉心203に対して挿入又は引出されることを可能にするように構成されている。

【0059】

40

炉心203の1つの構成では、伝導熱伝達機構を強化するために、冷却経路207が炉心203の内側の場所から内側フィン207Aを経由して外側フィン208に達する熱伝導管を実現するので、この冷却経路207が、伝導性冷却経路207を形成するフィンに燃料エレメント221を熱的結合させることによって得られるだろう。フィン207Aは、回収熱交換器305から出てくるガス流を流れ反転構造206の中に方向付けるように構成されており、これと同時に、炉心203の内部構造のための構造的サポートと、炉心からフィン208に熱エネルギー(即ち、崩壊熱)を受動的に伝達するための熱伝達経路とを実現するだろう。流れ反転構造206は、低い流体力学的な抵抗を提供するように構成されており、及び、炉心の構造的サポートを提供すると同時に、伝導熱伝達機構によって炉心から可搬式原子力発電機の外部フィン208への崩壊熱エネルギーの伝達を確実なものに

50

するだろう。したがって、炉心 203 は、冷却材の完全喪失の場合にさえ、可搬式原子力発電機を取り囲む環境に対して崩壊熱エネルギーを安全に且つ受動的に伝達することが可能である。

【0060】

図 10 と図 10A と図 10B は、出力変換モジュール 300 に統合されている低背圧回収熱交換器統合熱交換器の例示的な実施形態の斜視図である。図 10 と図 10A と図 10B に示されているように、作動流体であるガス 312 は、回収熱交換器 305 の中に一方の側において入り、完全な 360 度のループを行い、及び、(例示的な一実施形態では対称的な)回収熱交換器から出て行く。このようにして、ガス 312 は、回収熱交換器 305 の外側表面との熱的に接触している流体と混合することなしに、回収熱交換器 305 の内側表面と熱エネルギーを交換する。

10

【0061】

図 11 は、出力変換モジュール 300 に統合されている低背圧統合回収熱交換器 305 の熱交換器の、完全にアセンブリされた例示的な構成の斜視図である。この構成は、ターボ機械を出て行く作動流体 312A (高温ガス)と、図 5 及び図 6 で説明されている圧縮機 304C から戻る流体 312B (低温ガス)との間の分離を実現する。

図 12 は、図 11 の完全にアセンブリされた低背圧統合回収熱交換器 305 の熱交換器の例示的な実施形態の斜視図であり、この図は、図 10 に示されている、熱交換器 305 の入口に入る流体 312A と、出力変換モジュールの中間冷却器部分 307 から戻る流体 312B との間の別々の流れパターンによって生じさせられる熱伝達を示し、この熱伝達は、熱交換器 305 のユニークな幾何学的形状による最小の背圧によって、さもなければターボ機械の放出において浪費されることとなる熱エネルギーを回収する機能を果たす。図 13 は、「ホット (hot)」原子炉出力モジュールを交換するように構成されており、及び、輸送又は保管の準備のために原子炉出力モジュールの封止を行うことに特化されている装置の、例示的な実施形態の斜視図である。この図に示されているように、モジュール交換装置 500 の例示的な実施形態が、原子炉出力モジュール 200 の封止と、出力変換モジュール 300 の分離とを行うために、フランジ 503 と連結されることになるフランジ 505 を使用する。フランジ 503 とフランジ 505 が連結されている時に、これらのフランジは、図 1 に示されているフランジ 201、301 に対して封着する。油圧で作動させられる締め付け固定具 501 が、フランジ 201 とフランジ 301 とを分離させると同時に、機構 502 が、原子炉出力モジュール 200 を封止する閉鎖部分 501 を挿入する。図 14 と図 15 は、完全にアセンブリされた可搬式原子力発電機の単一容器 100 から原子炉出力モジュール 200 を分離させ、且つ、原子炉出力モジュールを封止フランジ 501 で封止するために、交換装置 500 によって使用される例示的なシーケンスを示す斜視図である。

20

30

【0062】

図 16 は、輸送標準規格に準拠しており、且つ、輸送及び運転中にモジュール 200、300、400 を固定することを可能にするガイド 601 を備えている、例示的なモジュール型の輸送プラットフォーム 600 を示す斜視図である。この構成では、これらのモジュールは、配備場所における重量物吊り下げクレーンを必要とせずに迅速な連結と分離とを実現するために、滑動することが可能である。

40

【0063】

図 17 は、原子炉出力モジュール 200 の迅速な「ホット」回収 (停止から短時間後における炉心回収) を可能にするための遮蔽体 700 と受動冷却構造 701 とが追加されている、図 16 に示されている例示的な可搬式原子力発電機の輸送プラットフォーム 600 を示す斜視図である。この実施形態では、原子炉出力モジュール 200 が停止後に比較的短時間の内に輸送されなければならない場合に、可搬式原子力発電機の単一容器 100 全体、又は、原子炉出力モジュール 200 だけが、熱伝達を増大させるように浸水させられるだろう。この構成では、迅速な炉心回収の最中に放射線場を減衰させるために厚い水の壁を形成するように、膨張可能な遮蔽体 700 が水で満たされると同時に、炉心が受動

50

的に温度低下し続ける。

【 0 0 6 4 】

図 1 8 は、図 1 に示されている例示的な可搬式原子力発電機のブロック図の一変型の側面断面図であり、この図では、可搬式原子力発電機の水平（又は、垂直）運転のための装置すべてを備える単一の容器が、典型的な加圧水型原子炉（PWR）に関しては、一次ループ内を循環する炉心 2 0 3 冷却材としての水を使用する運転のために構成されている。ランキン出力サイクルを形成する二次ループ内の作動流体 8 0 5 も水である。この構成では、可搬式原子力発電機は、分離熱交換器によって互いに分離される一次ループと二次ループを備え、この分離熱交換器の一次側 8 0 2 は、原子炉冷却材ポンプ 8 0 1 を経由した強制対流によって循環させられる水 8 0 4 を介して炉心 2 0 3 から熱エネルギーを受け取る。

10

【 0 0 6 5 】

図 1 8、図 1 9、図 2 0、図 2 1 を参照すると、冷却材及び作動流体としての水を使用して動作する可搬式原子力発電機の例示的な実施形態において、原子炉冷却材ポンプ 8 0 1 が、図 1 8 に示されているドライヘッド（dry head）又はチャンバ 2 1 0、又は、図 2 1 に示されている環状ジャケットのどちらかの上に配置されているキャンドポンプ（canned pump）として構成されるだろう。一次ループ内の圧力は、加熱器 8 0 0 B と噴霧器 8 0 0 A とを備える加圧器 8 0 0 を使用して調節される（図 2 1）。この構成における制御及び受動的崩壊熱除去システムは図 1 から図 7 で説明した制御及び受動的崩壊熱除去システムと同一である。

20

【 0 0 6 6 】

流路 8 0 5 によって示されている二次ループは、分離熱交換器 8 0 2、8 0 3 を使用して一次ループから熱エネルギーを受け取る。水が、給水ポンプ 8 0 8 を使用して熱交換器 8 0 3 の二次側を通して循環させられる。水蒸気が分離熱交換器 8 0 3 の二次側を出る時に、この水蒸気がターボ機械 8 0 6 内で膨張し、このターボ機械内では水蒸気のエネルギーが、発電モジュール 4 0 0 と発電機 4 0 2 とに伝達される機械的エネルギーに変換される。ターボ機械 8 0 6 と高速発電機 4 0 2 は、図 1 から図 7 に関して説明されているように、出力変換モジュール 3 0 0 と発電モジュール 4 0 0 との間のシャフト 3 1 0 と分離機構とを使用して機械的に連結されている。水蒸気がターボ機械 9 0 6 の放出において排出されると、この水蒸気は、凝縮器 8 0 7 内での凝縮の前に統合型熱交換器再加熱器 8 0 9

30

【 0 0 6 7 】

凝縮器 8 0 7 は、図 1 から図 7 に示されているような重力駆動式の熱伝達機構を有するフィン 2 0 8 を使用して、熱エネルギーを環境に伝達する。炉心 2 0 3 からの短時間内の崩壊熱除去が、UPS 4 0 3 の使用によって電力欠如状態においても行われるだろう。炉心 2 0 3 が耐溶融性セラミック材料で形成されていることがある構成では、冷却材完全喪失シナリオの状況下でさえ、伝導機構による受動的冷却が、炉心温度が安全マージンよりも低いことを確実なものにする。異なる圧力バウンダリで動作する一次ループと二次ループとを備える可搬式原子力発電機構成は、分離熱交換器によって出力変換モジュールから分離されており、且つ、二次ループ内でのブレイトン又はランキン出力サイクルの使用を

40

【 0 0 6 8 】

図 2 2 は、迅速な配備のための、且つ、乾燥した環境的条件及び極端な環境的条件を有する配備場所を含む任意の配備場所で発電する準備が整っている、標準的な輸送プラットフォーム 9 0 0 上に固定されている例示的な完全アセンブリ状態の可搬式原子力発電機のスケール表示（scale indication）を示す斜視図である。

【 0 0 6 9 】

図 2 3 と図 2 3 A は、高温炉心除去シナリオの状況下での放射能遮蔽を確実なものにするために付加型の受動的冷却機能 7 0 1 と膨張性シールド 7 0 0 とを伴う形で示されている、迅速「ホット」原子炉出力モジュール輸送（即ち、緊急現場抜き取り（emerge

50

ncy site extraction) のための、標準的な輸送プラットフォーム 900 上に固定されている可搬式原子力発電機の例示的な原子炉出力モジュールの斜視図である。

【0070】

図 24 と図 24A は、冷却材の完全喪失時にさえ受動的に冷却されることが可能な耐熔融性炉心を形成する、好ましい伝導性セラミック炉心部分 221 と完全セラミックマイクロカプセル封止 (FCM) 燃料エレメント 901 との斜視図である。FCM 燃料は、例えば炭化ケイ素 (SiC) のような低中性子吸収セラミック複合材料を使用する。SiC 複合材料は、高温において水と空気とに対する非常に低い反応速度を有し、炭素ダストを発生させず、照射後の低温における高速のエネルギー放出からのウィグナー効果がなく、放射線に対する良好な耐性を有し、照射を受けても非常に小さい寸法的变化しか示さず、及び、非常な高温においてさえ核分裂生成物拡散に対する非多孔性の不浸透性のバリアを提供するので、原子炉内での使用に関して、黒鉛に比較して多くの利点を有する。

10

【0071】

1 つの構成では、炉心 203 は、堅牢性を確実なものにするために、SiC 繊維を含む一方向性の繊維強化 NITE 焼結 SiC の複合構造物で作られている燃料エレメント 901、221 によって形成されるだろう。炉心 203 の拘束装置と、ホットダクト (hot duct) と、すべての流路 220A と、制御棒チャンネル 222 も、繊維強化複合材料で作られる。例えば、図 6 に示されている統合型回収熱交換器熱交換器 305 は、コンパクト性と有効性と低背圧とを提供するために、ターボ機械の周囲で利用可能な環状空間内に収まるように設計されている、SiC PC (プリント回路) ガス - ガス熱交換器で形成されるだろう。炉心 203 内の他の SiC 構造が、SiC - Gd²⁰³ 及び Er²⁰³ の焼結混合物で作られている制御棒と、制御棒スリーブとを含む。最後に、圧力容器は、予め応力が与えられている SiC 複合材料で作られるだろう。幾つかの構成では、例えば敵対的な事象 (ミサイル攻撃) によって生じさせられる爆発によって生じさせられる過酷な運動学的応力のような過酷な運動学的応力を燃料エレメント 221 が被る場合に、成形体 902 又は燃料エレメント 901 を通って亀裂が生じることがない形で、燃料エレメント 221 の管理された破砕を可能にするために、燃料エレメント 221 は部分的な切れ目 906、905 を有する。このようにして、及び、壊滅的な攻撃の結果として、燃料ブロック又はエレメント 221 は、管理された部分的切れ目 906、905 に沿って破断され、これによって、最も過酷な「設計基準を越える事故」又は攻撃シナリオの状況下でさえも、燃料エレメント 901 を無傷な状態のままに保つだろう。この特徴は、炉心又はその破断された燃料ブロック 221 がすべての揮発性物質を収容することを可能にし、過酷な炉心破壊シナリオの結果を著しく緩和する。「設計基準を越える事故」又は攻撃シナリオの状況下でも、すべての放射性の揮発性物質が燃料エレメント 901 内に閉じ込められた状態のまま残るので、この可搬式原子力発電機は、すべての SMR 及び大型原子炉によって必要とされるような避難計画区域を必要としない。

20

30

【0072】

当業者は、図面に詳細には示されていないことがある例示的な実施形態に到達するために、説明されている特徴の組合せがどのように形成されることが可能であるかを理解するだろう。

40

【0073】

本発明の様々な側面又は詳細事項が、本発明の範囲からの逸脱なしに変更されることが可能である。さらに、上述の説明は単なる例示を目的とするものであるにすぎず、本発明を限定するためのものではなく、及び、本発明は特許請求項によって定義されている。

【 図 1 】

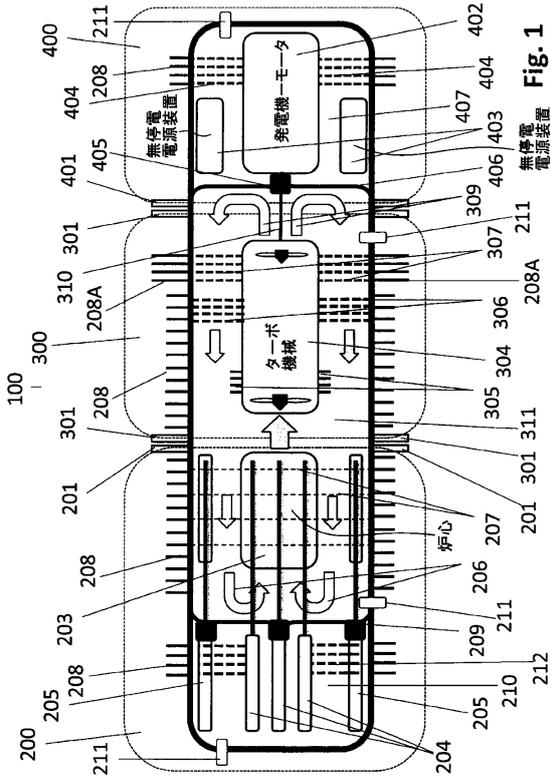


Fig. 1

【 図 2 】

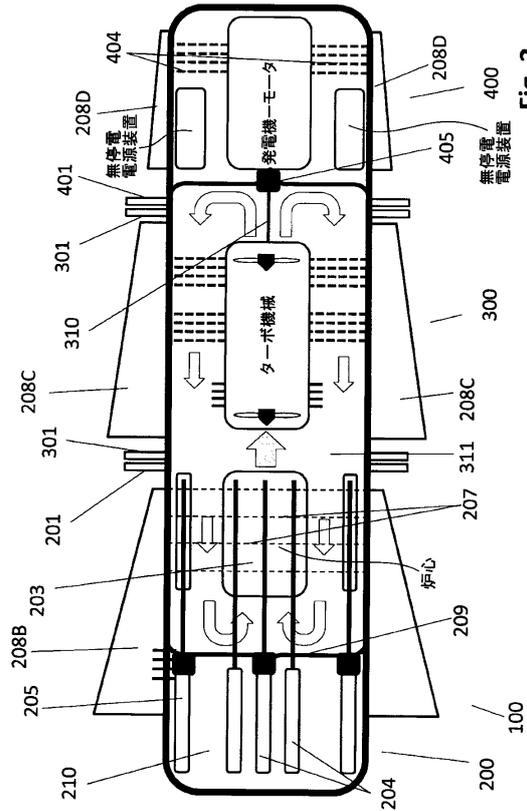


Fig. 2

【 図 3 】

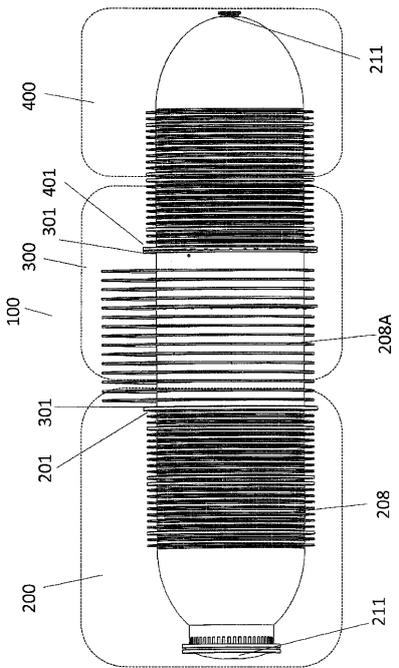


Fig. 3

【 図 4 】

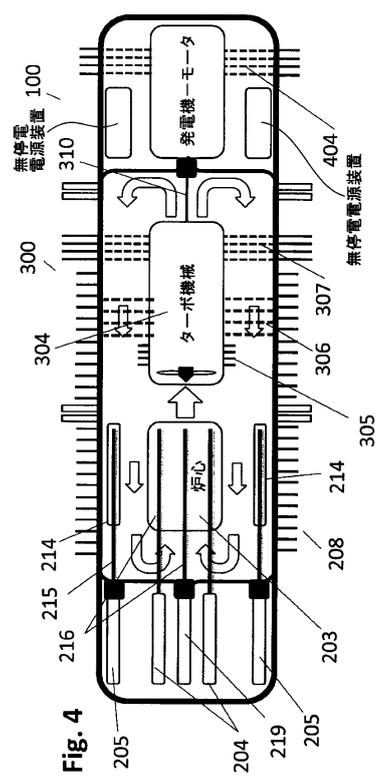


Fig. 4

【 図 5 】

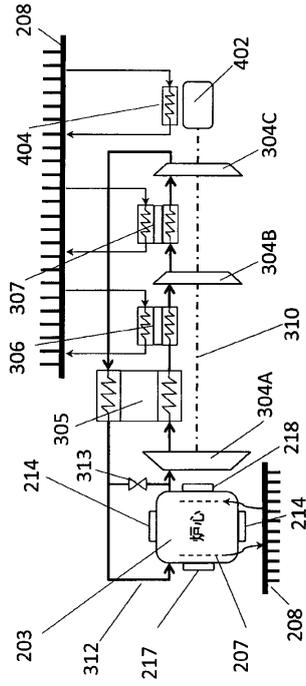


Fig. 5

【 図 7 】

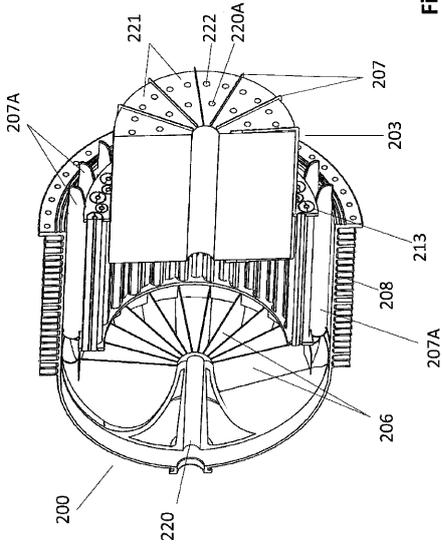


Fig. 7

【 図 6 】

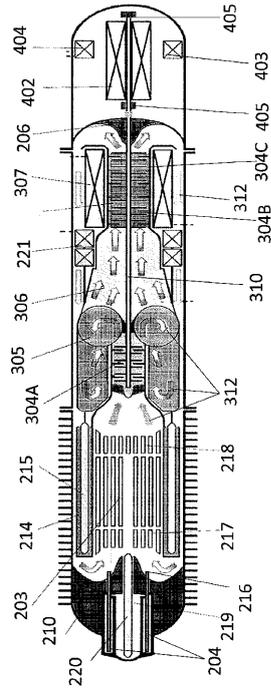


Fig. 6

【 図 8 - 9 】

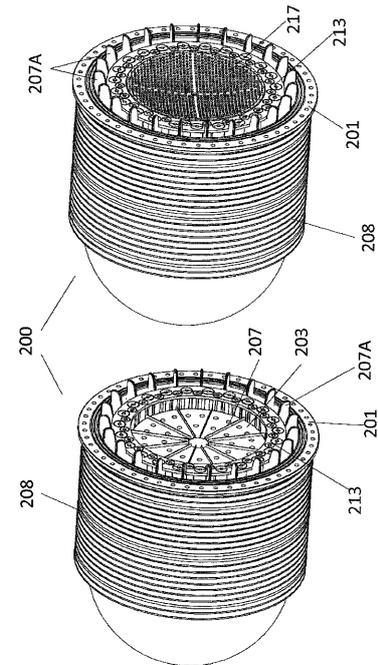
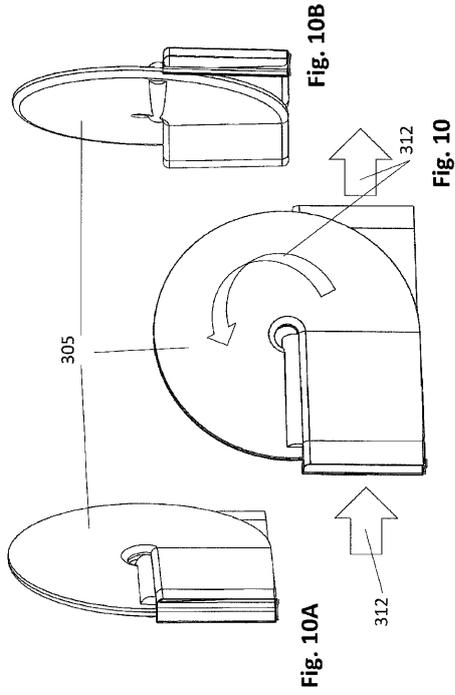


Fig. 9

Fig. 8

【 10 - 10 B 】



【 11 】

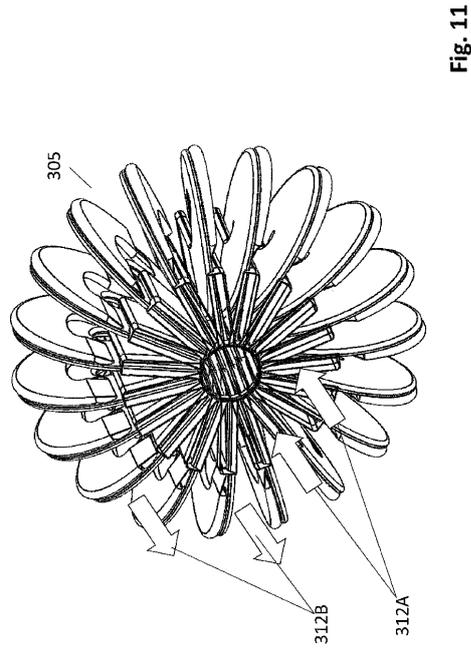


Fig. 11

【 12 】

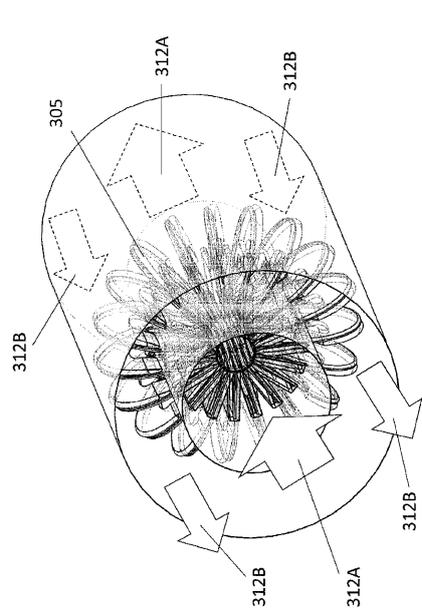


Fig. 12

【 13 】

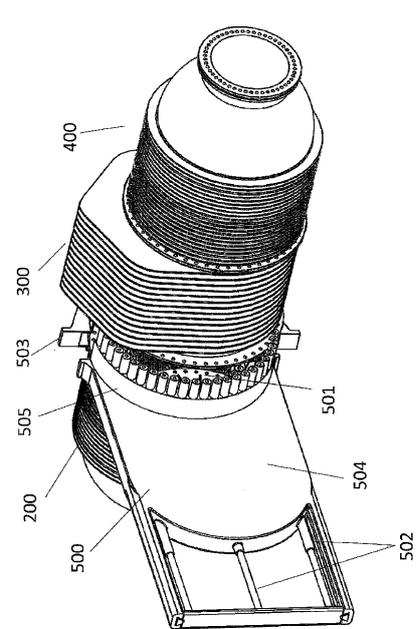


Fig. 13

【 14 】

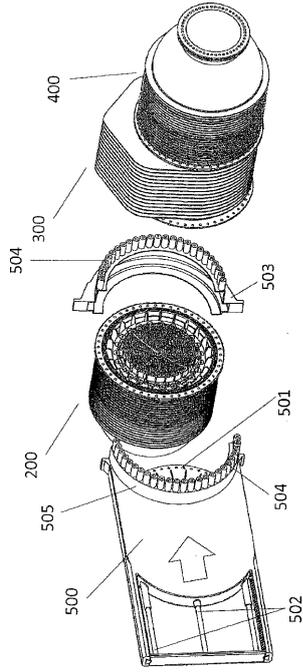


Fig. 14

【 15 】

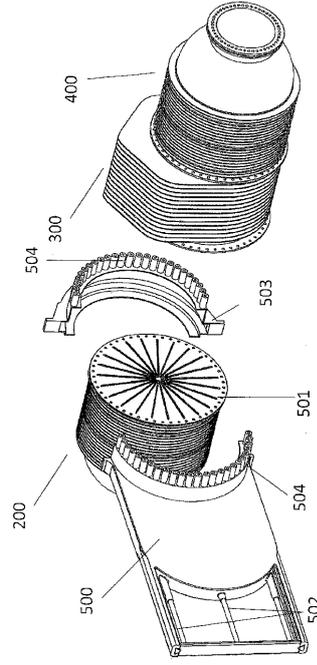


Fig. 15

【 16 】

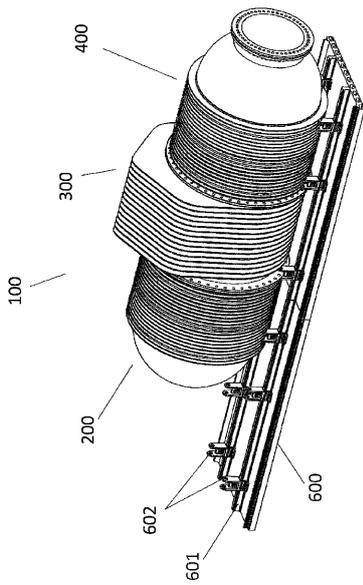


Fig. 16

【 17 】

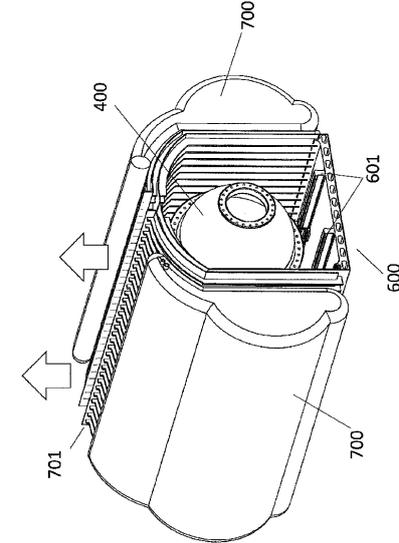


Fig. 17

【 図 18 】

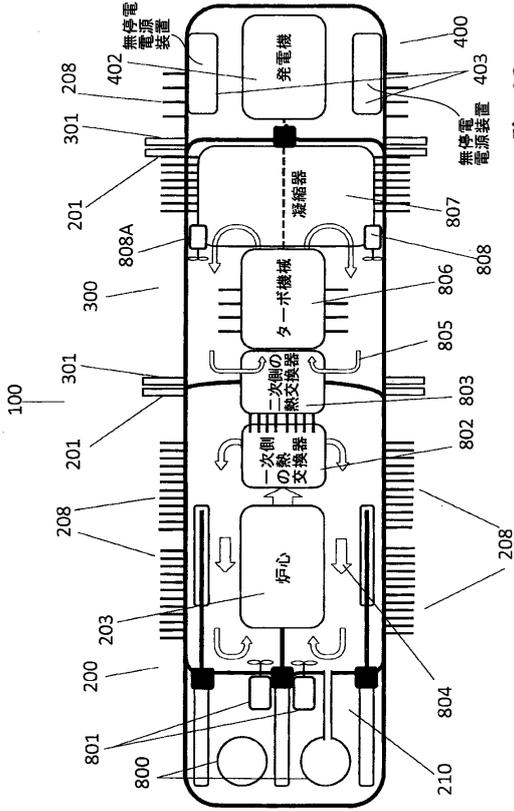


Fig. 18

【 図 19 】

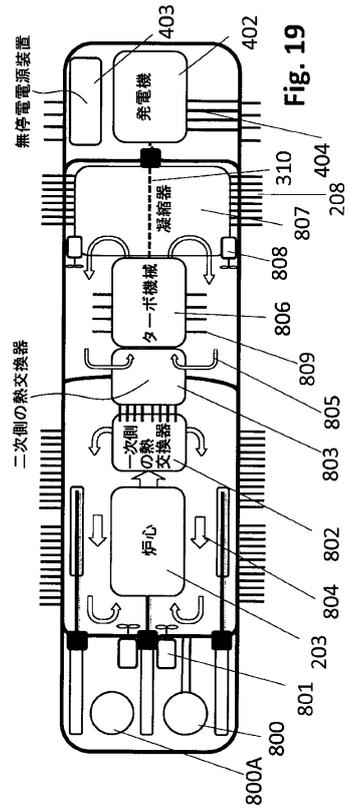


Fig. 19

【 図 20 】

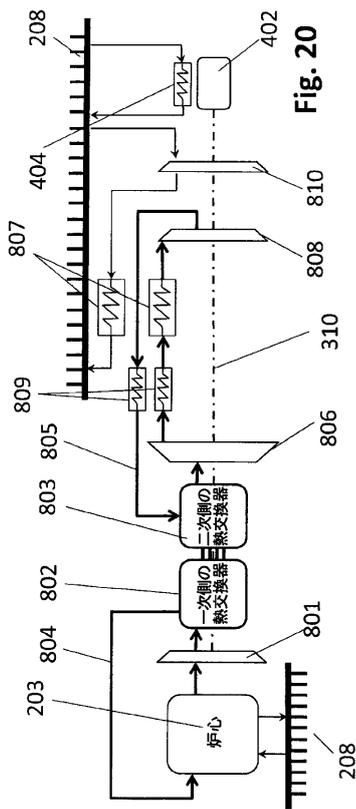


Fig. 20

【 図 21 】

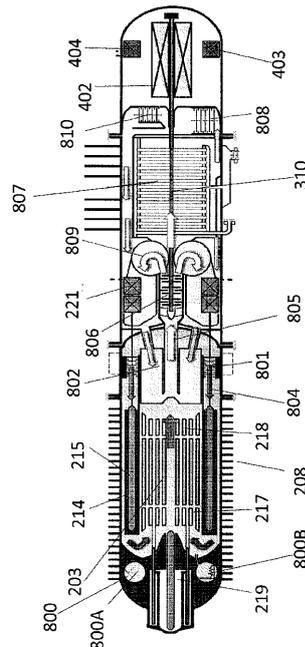


Fig. 21

【 2 2 】

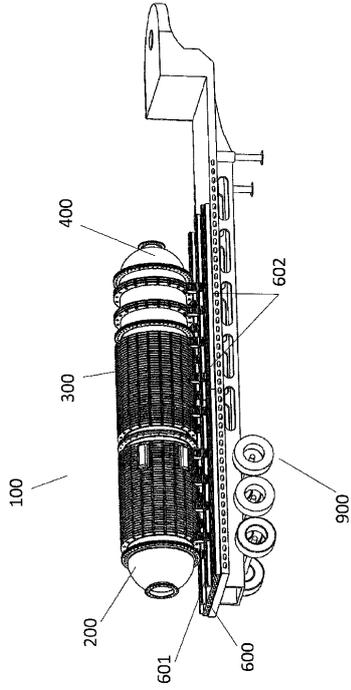


Fig. 22

【 2 3 】

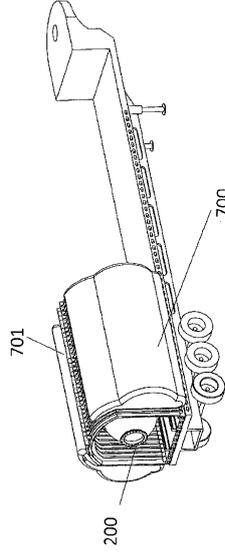


Fig. 23

【 2 3 A 】

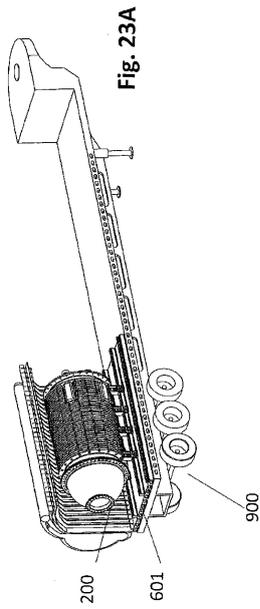


Fig. 23A

【 2 4 】

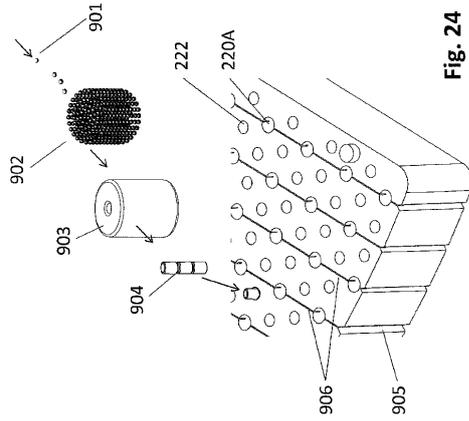


Fig. 24

【 2 4 A 】

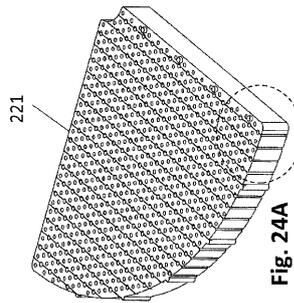


Fig. 24A

フロントページの続き

(51)Int.Cl.		F I			
G 2 1 C	15/18	(2006.01)	G 2 1 C	15/02	Z
G 2 1 C	7/28	(2006.01)	G 2 1 C	5/00	C
G 2 1 C	9/033	(2006.01)	G 2 1 C	15/18	U
G 2 1 D	5/14	(2006.01)	G 2 1 C	15/18	E
G 2 1 D	5/12	(2006.01)	G 2 1 C	7/28	
G 2 1 D	3/00	(2006.01)	G 2 1 C	9/02	L
G 2 1 D	9/00	(2006.01)	G 2 1 D	5/14	
G 2 1 C	3/62	(2006.01)	G 2 1 D	5/12	
G 2 1 C	3/30	(2006.01)	G 2 1 D	3/00	E
G 2 1 C	3/20	(2006.01)	G 2 1 C	5/00	B
G 2 1 C	7/24	(2006.01)	G 2 1 D	9/00	
G 2 1 C	7/10	(2006.01)	G 2 1 C	3/62	A
			G 2 1 C	3/30	Z
			G 2 1 C	3/20	B
			G 2 1 C	7/24	
			G 2 1 C	7/10	C

(74)代理人 100141081

弁理士 三橋 庸良

(74)代理人 100147555

弁理士 伊藤 公一

(72)発明者 クラウディオ フィリップソン

アメリカ合衆国, メリーランド 20740, カレッジ パーク, フォーティエイズ プレイス
8708

(72)発明者 フランチェスコ ベネリ

アメリカ合衆国, ニューメキシコ 87544, ロス アラモス, ピエドラ ループ 188

審査官 藤本 加代子

(56)参考文献 特表2011-503616(JP, A)

米国特許出願公開第2012/0140867(US, A1)

特開2007-291869(JP, A)

特表2004-522052(JP, A)

特開2004-044411(JP, A)

大坪章, 可搬型炉特性パラメータ解析計算, 資料, 日本, 動力炉・核燃料開発事業団, 1998
年 6月, PNC TN9410 98-059大坪章, 小綿泰樹, 可搬型炉と原子力電池の研究開発についての調査, 資料, 日本, 核燃料サイ
クル開発機構, 1999年 1月, JNC TN4420 98-001

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 2 1 D 5 / 0 2

G 2 1 D 5 / 1 2

G 2 1 D 5 / 1 4

G 2 1 D 3 / 0 0

G 2 1 D 9 / 0 0

G 2 1 C 1 / 0 0

G 2 1 C 5 / 0 0

G 2 1 C 7 / 1 0
G 2 1 C 7 / 2 4
G 2 1 C 7 / 2 8
G 2 1 C 1 5 / 0 2
G 2 1 C 1 5 / 1 8
G 2 1 C 3 / 2 0
G 2 1 C 3 / 3 0
G 2 1 C 3 / 6 2
G 2 1 C 9 / 0 3 3