

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6131026号
(P6131026)

(45) 発行日 平成29年5月17日 (2017.5.17)

(24) 登録日 平成29年4月21日 (2017.4.21)

(51) Int.Cl.	F 1
G 2 1 B 1/11 (2006.01)	G 2 1 B 1/00 C
G 2 1 B 1/17 (2006.01)	G 2 1 B 1/00 D

請求項の数 12 外国語出願 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2012-259365 (P2012-259365)	(73) 特許権者	500520743
(22) 出願日	平成24年11月28日 (2012.11.28)		ザ・ボーイング・カンパニー
(65) 公開番号	特開2013-127457 (P2013-127457A)		The Boeing Company
(43) 公開日	平成25年6月27日 (2013.6.27)		アメリカ合衆国、60606-2016
審査請求日	平成27年11月10日 (2015.11.10)		イリノイ州、シカゴ、ノース・リバーサイド・プラザ、100
(31) 優先権主張番号	13/306,643	(74) 代理人	100109726
(32) 優先日	平成23年11月29日 (2011.11.29)		弁理士 園田 吉隆
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100101199
			弁理士 小林 義敦
		(72) 発明者	ウィーバー, トマス リーマン
			アメリカ合衆国 ミズーリ 63119-
			1940, ウェブスター グローブス,
			フェアビュー アヴェニュー 721

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 核融合炉に採用される反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持する方法、システムおよびタイル

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

核融合炉（100）に採用される反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持する方法であって、

前記反応炉チャンバ（240）の前記内壁の表面上に少なくとも1つのタイル（710）の少なくとも1つの層を実装するステップと、

前記反応炉チャンバの内側に対向する前記少なくとも1つのタイル（710）の一部が複数のチャンネル（705）を含み、且つ

前記液体リチウムに電荷を供給するステップと、

少なくとも1つのタイル（110、200）に液体リチウムを流すステップと、

前記液体リチウムを前記チャンネル（705）に流し、前記反応炉チャンバ（240）の内側に対向する少なくとも1つのタイル（710）の外表面に達するように、前記少なくとも1つのタイル（710）内部の網目構造に前記液体リチウムを循環させるステップと、

前記循環させた液体リチウムを前記少なくとも1つのタイル（710）から排出するステップと

を含む方法。

【請求項 2】

前記少なくとも1つのタイル（710）内部の網目構造及び、

前記少なくとも1つのタイル（710）の前記チャンネル（705）が耐高温開放気泡多

10

20

孔質材料から製造される
請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記耐高温開放気泡多孔質材料は発泡セラミック及び発泡金属のうちの 1 つであり、且つ、

前記チャンネル（705）はソリッドセラミックストリップ（720）によって液圧的に且つ電氣的に互いに分離されている

請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記耐高温開放気泡多孔質材料は発泡セラミック及び発泡金属のうちの 1 つであり、且つ、

前記チャンネル（705）はリチウムを遮断する電気絶縁被覆によって処理された発泡セラミックストリップ（720）によって液圧的に且つ電氣的に互いに分離されている

請求項 2 に記載の方法。

【請求項 5】

前記方法は、前記少なくとも 1 つのタイル（710）と前記反応炉チャンバ（240）の内壁の表面との間に少なくとも 1 つの磁気コイル（1010）を実装するステップをさらに含む、請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 6】

前記電荷を供給するため前記少なくとも 1 つの電圧源（760）が使用される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記少なくとも 1 つのタイル（710）は前記少なくとも 1 つのタイル（710）の内部に少なくとも 1 つの開放気泡を含み、

前記液体リチウムは前記少なくとも 1 つの開放気泡を介して少なくとも 1 つのタイル（710）全体を循環する

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

前記少なくとも 1 つのタイル（710）が供給プレナム（780）を含み、

前記液体リチウムが前記供給プレナム（780）を介して前記少なくとも 1 つのタイル（710）に供給される

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 9】

前記少なくとも 1 つのタイル（710）が排出プレナム（790）を含み、

前記液体リチウムが前記排出プレナム（790）を介して前記少なくとも 1 つのタイル（710）に排出される

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 10】

前記少なくとも 1 つのタイル（710）内部の網目構造を循環する液体リチウムの流量が時間と共に変動する

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

核融合炉（100）に採用される反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するシステムであって、

前記液体リチウムに電荷を供給するための少なくとも 1 つの電圧源（760）と、
少なくとも 1 つのタイルであって、前記反応炉チャンバの内側に対向する前記少なくとも 1 つのタイル（710）の一部が複数のチャンネル（705）を含む少なくとも 1 つのタイルと、

前記少なくとも 1 つのタイル（710）の少なくとも 1 つの層が前記反応炉チャンバの前記内壁の表面に実装されている前記反応炉チャンバとを含み、

10

20

30

40

50

前記少なくとも1つのタイル（710）はさらに、
供給プレナムであって、帯電した前記液体リチウムが該供給プレナムを介して前記少なくとも1つのタイル（710）に供給される、供給プレナム（780）と、
内部の網目構造であって、その全体にわたって前記液体リチウムが循環され、前記チャンネル（705）に流入し、前記反応炉チャンバの内側に対向する前記少なくとも1つのタイル（710）の外表面に到達させるための、内部の網目構造と、
排出プレナムであって、前記循環した液体リチウムが該排出プレナムを介して前記少なくとも1つのタイル（710）から排出するための排出プレナム（790）と、を含む、
システム。

【請求項12】

核融合炉（100）に採用される反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するためのタイル（710）であって、

耐高温開放気孔多孔質材料と、

複数のチャンネル（705）と、

前記タイル（710）の内部及び前記タイル（710）の前記チャンネル（705）に帯電した液体リチウムを循環させるための前記タイル（710）内部の少なくとも1つの開放気泡と

を含むタイル。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

有望視されているトカマク型核融合炉のプラズマは不安定なため、要求される炉内の環境条件はきわめて厳しいものになっている。プラズマの安定性を改善するため、複数の方法が確認されている。プラズマを十分に制御するためには問題点があり、方法によっては相互の適合性が悪く、プラズマ接触面でスペースを確保するための競合が起るため、既知の方法の組合せを実装するのは困難である。核融合エネルギー実験では、プラズマに対向する電気コイルの使用が、プラズマの不安定性の制御に有効であることが示されている。さらに、実験により、熔融リチウムはプラズマに対向可能であることが示されている。このような限界及びその他の問題点に対処するための解決策が必要となっている。

【発明の概要】

【0002】

本発明の一態様によれば、核融合炉環境におけるプラズマの電磁的制御のための装置、システム、及び液体リチウム第一壁が提供される。本発明の一態様によれば、反応炉チャンバの第一壁の表面に液体リチウムを保持する方法が提供される。この方法は、反応炉チャンバの内壁の表面上に少なくとも1つのタイルからなる少なくとも1つの層を実装するステップを含む。一又は複数の実施形態では、反応炉チャンバの内側に対向するタイル（複数可）の一部は複数のチャンネルを含む。この方法はさらに、液体リチウムに電荷を印加するステップを含む。また、この方法はタイル（複数可）への液体リチウムを流すステップを含む。加えて、この方法は、液体リチウムがチャンネル内を流れ、反応炉チャンバの内側に対向するタイル（複数可）の外表面に達するように、タイル（複数可）内部の網目構造を循環させるステップを含む。さらに、この方法は循環した液体リチウムをタイル（複数可）から外に出すステップを含む。

【0003】

既に説明したように、一又は複数の実施形態では、タイル内部の網目構造及びタイルのチャンネルは、耐高温開放気孔多孔質材料から製造される。少なくとも1つの実施形態では、耐高温開放気孔多孔質材料は発泡セラミック又は発泡金属であり、さらにチャンネルはソリッドセラミックストリップによって液圧的に且つ電氣的に互いに分離されている。他の実施形態では、耐高温開放気孔多孔質材料は発泡セラミック又は発泡金属であり、さらにチャンネルはリチウムの遮断による電気絶縁被覆によって処理される発泡セラミックストリップによって液圧的に且つ電氣的に互いに分離されている。

【0004】

少なくとも1つの実施形態では、既に説明したように、タイルは耐高温開放気泡多孔質材料から製造される。幾つかの実施形態では、耐高温開放気泡多孔質材料は発泡セラミックであり、さらにチャンネルはリチウムを遮断する非導電被覆によって処理される発泡セラミックストリップによって液圧的に且つ電氣的に互いに分離されている。

【0005】

既に説明したように、一又は複数の実施形態では、開示されている方法は、タイル（複数可）と反応炉チャンバの内壁の表面との間に少なくとも1つの磁気コイルを実装するステップをさらに含む。少なくとも1つの実施形態では、電荷を供給するため少なくとも1つの電圧源が使用される。一又は複数の実施形態では、反応炉チャンバは核融合炉に使用される。少なくとも1つの実施形態では、少なくとも1つのタイルは規格に適合しない形状を有する。幾つかの実施形態では、少なくとも1つのタイルは規格に適合した形状を有する。

10

【0006】

少なくとも1つの実施形態では、既に説明したように、少なくとも1つのタイルはタイル（複数可）内部に少なくとも1つの開放気泡を有し、液体リチウムはこの開放気泡（複数可）を介してタイル（複数可）内部全体に循環する。幾つかの実施形態では、少なくとも1つのタイルは一定の気泡率を有する。幾つかの実施形態では、少なくとも1つのタイルは多様な気泡率を有する。

【0007】

20

既に説明したように、一又は複数の実施形態では、少なくとも1つのタイルは供給プレナムを有し、液体リチウムは供給プレナムを介してタイル（複数可）内へ供給される。少なくとも1つの実施形態では、供給プレナムは中空の金属片である。幾つかの実施形態では、少なくとも1つのタイルは排出プレナムを有し、液体リチウムは排出プレナムを介してタイル（複数可）外へ排出される。少なくとも1つの実施形態では、排出プレナムは中空の金属片である。一又は複数の実施形態では、少なくとも1つのタイル内部の網目構造を循環する液体リチウムの流量は時間と共に変動する。

【0008】

本発明の一態様によれば、反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持する方法が開示されている。このシステムは少なくとも1つのタイルを含み、反応炉チャンバの内側に対向するタイル（複数可）の一部は複数のチャンネルを含む。このシステムはまた反応炉チャンバを含み、少なくとも1つのタイル（複数可）の層は反応炉チャンバの内壁の表面上に実装される。さらに、このタイル（複数可）によって、帯電した液体リチウムはタイル（複数可）に流入可能となる。また、このタイル（複数可）によって、液体リチウムはタイル（複数可）内部の網目構造全体を循環し、チャンネル内に流入し、反応炉チャンバの内側に対向するタイル（複数可）の外表面に達することが可能となる。さらに、このタイル（複数可）によって、循環した液体リチウムはタイル（複数可）から流出可能となる。

30

【0009】

本発明の一態様によれば、反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持する方法が開示されている。このタイルは耐高温開放気泡多孔質材料から製造される。このタイルは複数のチャンネルを含む。このタイルはまた、帯電した液体リチウムをタイル内部及びタイルのチャンネル内で循環させるため、タイル内部に少なくとも1つの開放気泡を含む。

40

【0010】

特性、機能、及び利点は、本発明の様々な実施形態で独立に実現することが可能で、さらに別の実施形態で組み合わせることもできる。

【0011】

本発明のこれらの特徴、態様、及び利点と、その他の特徴、態様、及び利点は、下記の説明、添付の請求項、添付の図面を参照することでより良く理解されるであろう。

【図面の簡単な説明】

50

【0012】

【図1】本発明の少なくとも1つの実施形態による、トロイダル核融合炉の内部が図解されている。

【図2】本発明の少なくとも1つの実施形態による、反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するための1つのタイルの上面図を示している。

【図3】本発明の少なくとも1つの実施形態による、互いに隣接するように実装される図2のタイル4個の上面図を示している。

【図4】本発明の少なくとも1つの実施形態による、均一な気泡率を有する反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するための1つのタイルの側面断面図を示している。

10

【図5】本発明の少なくとも1つの実施形態による、図4のタイルの上面断面図である。

【図6】本発明の少なくとも1つの実施形態による、不均一な気泡率を有する反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するための1つのタイルの上面断面図を示している。

【図7】本発明の少なくとも1つの実施形態による、反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するための1つのタイルであって、液体リチウムに電荷が印加されると帯電した液体リチウムが流れるチャンネルを有するタイルの側面断面図である。

【図8】本発明の少なくとも1つの実施形態による、チャンネルを図解する図7のタイルの側面図である。

【図9】本発明の少なくとも1つの実施形態による、互いに隣接するように実装される図7のタイル4個の3列構成の上面図を示している。

20

【図10】本発明の少なくとも1つの実施形態による、図7の背後に取り付けられた2個の磁気コイルを含むトロイダル核融合炉の内部が図解されている。

【図11】本発明の少なくとも1つの実施形態による、任意の数のタイルに沿って描かれた図10の磁気コイルの上面図を示している。

【図12】本発明の少なくとも1つの実施形態による、図11の磁気コイルの上面断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

本明細書に開示されている方法及び装置は、核融合炉環境におけるプラズマの電磁的制御のための稼動システムを提供する。特に、このシステムは核融合炉環境におけるプラズマの電磁的制御のための液体リチウム(Li)第一壁に関する。具体的には、開示されているシステムは、核融合エネルギー炉内で液体リチウムを保持する高温高気泡率の開放気泡材料を使用し、これによって複雑な形状を有する炉内部表面の損傷を低減する。例えば、ボーイング剛性絶縁(BRI)材料は、高温耐性と良好な材料互換性を有する開放気泡多孔質セラミックであるが、開示されているシステムで使用する事ができる。加えて、開示されているシステムはまた、トリチウム増殖を目的とするリチウムへの高中性子束照射を提供する。

30

【0014】

BRI材料は、セラミックファイバーを独自に組み合わせた、多孔質のセラミック製ファイバー絶縁材料で、熱伝導度がきわめて低く、低密度で高多孔質の材料を形成するように焼結されている。加えて、BRI材料は、高い引張強度ときわめて優れた寸法安定性を示す。具体的には、BRIは、二酸化ケイ素(SiO_2)ファイバーと酸化アルミニウム(Al_2O_3)ファイバーの組合せ、及び二酸化ケイ素ファイバーと酸化アルミニウムファイバーの融合と焼結に役立つホウ素含有粉末から製造される。BRI材料の絶縁能の優位性は、二酸化ケイ素ファイバーと酸化アルミニウムファイバーの方向性によって提供される。BRI材料は、きわめて低い熱伝導度を、特に厚み方向に対して示す。

40

【0015】

核融合エネルギー炉内のプラズマ制御の維持には、幾つかの困難があることが知られている。中でも、プラズマは高い電力密度で不安定になることがある。液体リチウムは反

50

応炉内のプラズマの安定に役立つことが知られている。プラズマはほとんどが陽イオンと負の電子で構成されており、プラズマのアウトーシースと反応壁付近はプラズマのコア部分よりも温度が低い。シースの中イオンは、コア部分のイオンよりも、プラズマから電子を捕捉して中性原子になる確率が高い。中性原子は磁場によって閉じ込めることができないため、プラズマを閉じ込める磁場を横切り、反応炉の壁に衝突する確率が高くなる。このプロセスで、中性原子はエネルギーの一部をプラズマから壁に運ぶため、プラズマシースをわずかに冷却し、壁をわずかに加熱する。核融合プラズマでは、中性原子の大部分は水素であるが、核融合反応によって作られるヘリウム及び反応炉構造物への偶発的なプラズマの衝突によって構造物から破碎されて飛び出すことがある重元素など、他の物質が存在することがある。壁が耐高温セラミック又は金属で作られている場合、中性原子は短時間だけ壁に張り付いた後、プラズマシースの中に戻る。しかしながら、壁からプラズマシースに再び入る原子はプラズマシースと比べてきわめて温度が低いため、シース内のプラズマ温度を大幅に下げる結果となる。通常、プラズマシースはプラズマコアよりも温度が低い、シースの温度が下がりすぎると、プラズマコアとシースとの間の温度差によって、プラズマの不安程度が増す。反応炉内壁のリチウムは内部に戻る中性原子を吸収し、これを放出しない傾向がある。壁に接触する中性原子を吸収し保持することによって、リチウムは原子が冷えた原子となってプラズマシースに戻るのを防ぎ、シースを高温に保ち、プラズマ全体がより安定化するのを助ける。

【0016】

現在、実験では、液体リチウムは、ほぼ垂直な側壁の直上にあるチャンネル（すなわち、チャンネルはトーラス型反応炉の中間部分となる「赤道部」の直上に位置する）から反応炉の側壁内側に沿って緩やかに流れる。重力により、液体リチウムは所定の位置に留まることなく、チャンネルから炉内壁を流れ落ち、別のチャンネルとリチウムを取り除くために炉のさらに下方に配置されたことによって集められる。この特有の方法は、重力によってリチウムがチャンネルから炉の底部まで流れ落ちるため、炉の赤道部から底部の大部分までの側壁を覆うことができる。しかし、この方法では明らかに炉の赤道部より上方の側壁を覆うことはできない。反応炉の最も低い部分では、液体リチウムは液溜り内及び粗い水平スクリーン上でも使用されるが、いずれも方法でも上壁で効果的に適用することはできない。開示したシステムでは、液体リチウムを反応炉内壁の全表面に保持することができる。

【0017】

反応炉壁上でリチウムの使用する場合のさらなる利点は、これが低原子番号（低Z）の物質であるという点にある。反応炉の壁の鋼鉄から鉄などの高原子番号（高Z）の物質がプラズマに入ると、その原子はプラズマ中のイオンから運動エネルギーを吸収することによって電子的に励起されることがある。典型的には、励起された高Z物質は、電磁エネルギー（光子）の形でエネルギーを放出して余分にエネルギーを失う。プラズマはほとんどの波長の電磁エネルギーに対して透過性があるため、励起された高Z物質によって放出された大部分の光子はプラズマを通り抜けて、反応炉の壁に吸収される。最終的な影響はプラズマからの全体的なエネルギー損失で、放射冷却と呼ばれている。プラズマの温度は低下し、反応炉壁の温度は上昇する。これは核融合炉反応を維持するために必要な作用とは反対の作用となる。リチウムなどの低Z物質は電子の数が少ないため、エネルギーを放射する可能性がある作用が少なく、結果的に低Z物質はプラズマの放射冷却を引き起こすことが比較的少ない。

【0018】

核融合炉壁の内側でリチウムを使用するさらなる利点は、反応炉の燃料となる2つの元素のうちの1つであるトリチウムは自然界では非常に希少であるが、核融合炉によって生成される高エネルギー中性子線束にリチウムを曝露することによって効率的に作り出すことができる。したがって、反応炉内で中性子線束が最も強いプラズマの近傍領域にリチウムを配置することができるならば、リチウムからトリチウムの生成は効率的になりうる。液体リチウムは炉内の他の物質の原子に結合しやすい傾向があるため、反応炉内でのリチウムの循環は、反応炉内に純粋なリチウムを導入する効果的な方法をもたらす、リチウ

ム内でトリチウムを生成し、反応炉からトリチウム化リチウムを汲み出し、これをリチウムからトリチウムを抽出する化学処理システムに通すことによって反応炉からトリチウムを取り除くことができ、このようにして反応炉の燃料となるとリチウム及び反応炉を再度循環させることができるきれいなリチウムを供給することができる。

【0019】

本発明のシステムは、重力及び電磁力に抗して反応炉壁の所定の位置に液体リチウムを保持することができる開放気泡多孔質材料を利用する。加えて、プラズマから不純物を吸収するため、この材料によってシステム全体から液体リチウムをゆっくりと汲み上げることができる。本開示システムの操作中、きれいなリチウムは最初システムに汲み上げられて反応炉壁内側に入り、ここでプラズマに曝露される。この位置で、きれいなリチウムはプラズマから不純物を吸収する。不純物で汚染されたりチウムは反応炉から取り出され、リチウムからプラズマ不純物を取り除くため処理される。リチウムから不純物を取り除かれた後、きれいになったリチウムはシステムに戻され再循環される。

10

【0020】

実験用トカマク及び他の型式の核融合エネルギー実験装置内部のプラズマに曝露された液体リチウムは、プラズマの安定化を支援し、プラズマが内部の高温を保つのに役立つことが示されている。しかしながら、これらの反応炉は典型的には、計測器、真空ポンプ用ポート、及び磁気コイルなどの種々のアイテム用の不連続部分及び開口部を多数有すると同時に、きわめて複雑な形状を有するように構築されていることに注意しなければならない。現在、不連続部分及び開口部をすべて有する反応炉壁の内側に液体リチウムを保持し、重力及び電磁力の影響に抗してリチウムを留まらせる効果的な方法は提案されていない。本発明は、不連続部分を備え、且つ反応炉壁表面の向き、重力及び電磁力の影響にかかわらず、反応炉壁の所定の位置で液体リチウムをゆっくりと流し続けることができる方法を教示する。

20

【0021】

これまでに、核融合プラズマに隣接する液体リチウムを用いた実験では、液体リチウムの壁を構築する方法ではなく、リチウムがプラズマに及ぼす影響に焦点が合わされてきた。液体リチウム- 水素プラズマ相互作用の実験を促進するため、5種類の特別な方法が用いられてきた。5種類の方法は次のとおりである。(1) トロイダル型反応炉の底部のトレイに配置される液体リチウムの液溜り、(2) 炉の底部に水平に配置される液体リチウムで濡れた金属スクリーン、(3) 帯状部分の上部から帯状部分の底部まで内表面に沿って流れ落ちる液体リチウムを有する反応炉の中央平面付近に配置されたバンド、(4) 炉底部の液溜りから炉の内壁を液体リチウムが絶えず再被覆するように物理的に回転される球形及び円筒形反応炉内へのプラズマ閉じ込め、及び(5) 例えば、フレイム溶射又はプラズマ溶射、及び多孔質金属を経由する溶融リチウムの汲み上げによって被覆することが可能な多孔質金属による、反応炉内側の垂直部分の部品の被覆。

30

【0022】

最初に挙げた2つの方法では、反応炉底部の小さな領域に対してリチウムの面を作り出すだけで限界がある。第3の方法は反応炉中央付近の帯状部分を覆うだけで、被覆された帯状部分を維持するためには流量を増やすことが必要となる。流量を増やすには反応炉の操作に要する汲み上げ力を高めなければならないため、反応炉が生み出すエネルギーを減じる結果となる。第4の方法はトロイダル型炉では容易には採用できないが、プラズマ閉じ込めに最も効果的な形状の磁場を有する。これらの炉の建設には剛体材料が使用されるため、トロイダル型炉の壁を持続的に回転することは不可能である。加えて、第4の方法は一定に動く反応炉の内側部分が必要で、真空ポンプ用ポート、センサー、及び磁気コイルなど、炉壁内になければならないその他の装置の配置および使用を妨げる。第5の方法は、リチウムの流れをほとんど制御できないこと、多孔質材料が高Z材料であること、反応炉の内側表面上での電流の制御を妨げる大面積の多孔質金属の使用などの欠点を有している。

40

【0023】

50

本発明は、重力及び電磁力に抗して液体リチウムを所定の場所に留め、プラズマから不純物を取り除くためシステム全体を通してゆっくりと液体プラズマを汲み上げるため、高温の開放気泡スポンジ様材料（例えば、ボーイング剛性絶縁（BRI）材料）から製造されるタイルを採用する。この方法には複数の利点がある。第1の利点は、タイルが小さなサイズで製造できることで、これにより反応炉の内面が複雑な形状であっても、トロイダル型炉の内面は液体リチウムで満たされたタイルのモザイクでタイル張りができる。第2の利点は、反応炉内にプラズマが存在する場合にタイルが曝露される高温に、タイルの材料（例えば、開放気泡を有する多孔質のセラミック）が耐えられることである。第3の利点は、タイルの材料（例えば、開放気泡を有する多孔質のセラミック）がリチウムの腐食作用に耐性があることである。第4の利点は、タイルの構成が調整可能なことで、液体リチウムの保持力及び流量に対して選択可能な細孔の大きさ及び／又は開放チャネルを作ることができる。

10

【0024】

さらに、第5の利点は、プラズマ崩壊によりプラズマがタイルに激しく衝突してリチウムの外表面が蒸発するような場合でも、タイルの高い透過性によってさらに多くのリチウムをタイル表面に排出させることができる。第6の利点は、タイル自体がプラズマの衝突によって部分的にはがれた場合でも、タイルの深さによってタイルが機能し続けるため、交換が必要になるまでタイルは数回のプラズマ衝突に耐えることができる。第7の利点は、タイルの一部がプラズマによって剥離した場合でも、タイルが作られる材料の大部分は低原子量元素であるため、高原子量金属の材料よりもプラズマに及ぼす悪影響が少なくなることである。第8の利点は、タイルの一部が剥離した場合でも、剥離したタイルの部分は、単純に液体リチウムで満たされた空間となる。このように、反応炉の壁に液体リチウムを保持するように、高温多孔質材料から作られるタイルの本開示システムによる使用は多くの利点を有する。

20

【0025】

核融合エネルギー実験では、プラズマに対向するように設置され、変調磁場を発生させる電気コイルは、プラズマの不安定化の制御に役立つことが示されている。しかしながら、核融合炉はきわめて厳しい内部環境を有するため、プラズマ近傍に電気コイルを配置することは実用的ではないことに注意しなければならない。上記で示唆されているように、溶融リチウムはプラズマに対向することができる1つの材料であることが実験によって示されている。本発明の一又は複数の実施形態では、プラズマに対向する電気コイルを採用する代わりに、プラズマの不安定化の制御に役立つように、プラズマに対向する電荷が液体リチウムに印加される。幾つかの実施形態では、プラズマの不安定化の制御に役立つ帯電した液体リチウムと連動して作用するように、電気コイルは液体リチウムを含む構造物の背後に設置される。

30

【0026】

下記の説明では、システムのさらに徹底した説明を提供するために多数の詳細事項が記載されている。しかしながら当業者には開示されたシステムをこれらの具体的な詳細事項なしで実行可能であることは明らかであろう。その他の場合では、システムを不要にわかりにくくしないために、よく知られる特徴については詳細に説明していない。

40

【0027】

図1は本発明の少なくとも1つの実施形態による、核融合炉100の内部が図解されている。この図では、核融合炉100がトラス型であることがわかる。本発明のシステムは種々の型式及び形状の核融合炉で使用可能であることに注意しなければならない。核融合炉100の第一壁は、耐高温多孔質材料から製造される小さなタイル110で裏打ちされている。これらの小さなタイル110により、液体リチウムは反応炉100の壁表面を覆うことができる。液体リチウムは反応炉100内部のプラズマの安定化に役立ち、プラズマ内部の高温維持に有効である。

【0028】

図2は本発明の少なくとも1つの実施形態による、反応炉チャンバの内壁の表面に液

50

体リチウムを保持するための１つのタイル２００の上面図を示している。タイル２００は、耐高温開放気泡多孔質材料で作られており、反応炉壁２４０上に実装される。この図では、タイル２００が供給プレナム２６０及び排出プレナム２８０を含むことが示されている。供給プレナム２６０及び排出プレナム２８０は共に、単一中空の非多孔質材料片（例えば、金属）である。

【００２９】

本システムの動作時には、供給プレナム２６０を通してタイル２００にきれいな液体リチウムが投入される。液体リチウムは供給プレナム２６０に印加される圧力、及び／又は排出プレナム２８０の位置に存在する真空によって、タイル２００の供給プレナム２６０に流れ込む。タイル２００の供給プレナム２６０に圧力を印加するシステムに採用される種々の型式のポンプには、限定しないが、プロペラポンプ、遠心ポンプ、及びピストンポンプが含まれる。きれいな液体リチウムは、タイル２００の本体２５０全体にわたる開放気泡又はチャンネルからなる内部の網目構造を循環する。きれいな液体リチウムは、タイル２００の開放気泡に浸透し、高温で希薄なプラズマ２３０を封じ込める反応炉内の空洞に面したタイル２００の多孔質外表面２２０に到達する。タイル２００の本体２５０内で液体リチウムの流れる方向は矢印２７０で示されている。

10

【００３０】

タイル２００の多孔質外表面２２０の上に存在するきれいな液体リチウムは、プラズマ２３０の不純物を吸収する。新たに不純物を含んだこの液体リチウムは、排出プレナム２８０を経由してタイル２００から取り除かれる。タイル２００から不純物を含んだ液体リチウムが取り除かれた後、液体リチウムから不純物を取り除くため、この液体リチウムは処理される。その結果きれいにされた液体リチウムはシステムに再循環される。

20

【００３１】

代替的な実施形態では、タイル２００は図２に描かれているような供給プレナム２６０及び／又は排出プレナム２８０を明確に含まないことがあるが、その代わり、液体リチウムをタイル２００に供給する及び／又はタイル２００から排出するための少なくとも１つの開放気泡又はチャンネルをタイル内部に有することに注意しなければならない。

【００３２】

図３は本発明の少なくとも１つの実施形態による、図２のタイル３１０を４個互いに隣接するように実装した構成３００の上面図を示している。この図では、タイル３１０が反応炉壁３３０の曲面に沿って互いに隣接するように実装可能であることが示されている。この構成でタイル３１０を実装する場合には、プラズマ３２０を含む反応炉内の空洞に面したタイル３１０の多孔質の外表面３４０が曲面を形成することが示されている。

30

【００３３】

図４は本発明の少なくとも１つの実施形態による、均一な気泡率を有する反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するための１つのタイル４１０の側面断面図を示している。この図では、タイル４１０が供給プレナム４３０及び排出プレナム４４０を有することが示されている。タイル４１０はまた、一様な気泡率４２０を有するように製造されることが示されている。加えて、タイル４１０の本体内で液体リチウムの流れる方向はこの図の矢印４５０で示されている。

40

【００３４】

図５は本発明の少なくとも１つの実施形態による、図４のタイル４１０の上面断面図である。この図は単純に、一様な気泡率４２０を有するタイル４１０の別の断面図を示している。加えて、幾つかの実施形態では、タイル４１０の側面領域５１０、５２０は、供給プレナム４３０及び排出プレナム４４０の製造に使用される同一の非多孔質材料で製造される。

【００３５】

図６は本発明の少なくとも１つの実施形態による、不均一な気泡率を有する反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するための１つのタイル６１０の上面断面図を示している。この図では、タイル６１０が供給プレナム６３０及び排出プレナム６４０を

50

有することが示されている。タイル610はまた、一様な気泡率620を有するように製造されることが図解されている。この図では、タイル610の本体の気泡率は、プラズマ670に面したタイル610の外表面660から供給及び排出プレナム630、640まで、徐々に減少することが示されている。またこの図では、矢印650はタイル610の本体内で液体リチウムの流れる方向を示している。

【0036】

図7は本発明の少なくとも1つの実施形態による、反応炉チャンバの内壁の表面に液体リチウムを保持するための1つのタイル710であって、液体リチウムに電荷が印加されると帯電した液体リチウムが流れるチャンネル705を含むタイル710の側面断面図である。図7のタイルは、流れるリチウムを含む気泡領域がプラズマ770に曝露される多数のチャンネル705に分割されている点で、図2及び4に示した基本的なタイル構成とは異なる。プラズマに面する領域では、リチウムチャンネル705は互いに電氣的に絶縁されている。プラズマに面する領域への供給及び排出点では、チャンネル705は物理的に接続され、これによってチャンネルを電氣的及び液圧的に平行にする。代替的な実施形態では、チャンネル705はタイル710の内部深くまで構築され、電氣的に絶縁された「帰還」チャンネルを有することができ、これによってプラズマに面するチャンネル705は電氣的及び液圧的に連続することができる。

10

【0037】

図4の基本タイル構成は、液体リチウムが流れる導電性の（例えば金属の）気泡又は電氣絶縁された（例えばセラミックの）気泡で製造可能な一体型の気泡タイル410からなる。図7のタイル710に関しては、タイル710のプラズマに面する部分は、内部を液体リチウムが流れるチャンネル705に分割されていて、互いに電氣的に絶縁されている。タイル710に電氣的に絶縁されたチャンネル705の製造を可能にする方法は幾つかある。第1の方法は、リチウムが流れるセラミック又は金属の気泡ストリップ（細長い一片）705の領域を有するようにタイル710の表面を加工する方法である。これらの領域705は中実のセラミックストリップ720によって液圧的及び電氣的に分離され、これによってリチウムチャンネル705を互いに電氣的に絶縁し、内部から導電性リチウムを排除することができる。

20

【0038】

電氣的に絶縁されたチャンネル705をタイル710に製造することができる第2の方法は、リチウムが流れるセラミック又は金属の気泡ストリップ705を有するようにタイル710の表面が加工される第1の方法と同様の方法である。これらの領域705は、リチウムが内部に浸透するのを防ぐように処理されたセラミックの気泡ストリップ720によって分離されている。この処理自体は電氣的に絶縁されていなければならない。処理された領域にリチウムが浸透するのを防ぐこと、及びセラミックの絶縁特性を維持することで、この処理によってストリップ720はリチウムチャンネル705を電氣的及び液圧的に絶縁することができる。

30

【0039】

電氣的に絶縁されたチャンネル705をタイル710に製造することができる第3の方法は、タイル710の表面をセラミック気泡から完全に加工する方法である。気泡の中では、細いストリップ720はリチウムをブロックする非導電性被覆によって処理され、これによって液体リチウムがこれらの領域を濡らして透過するのを防ぐ。液体リチウムは、処理済みストリップ720の間の未処理ストリップ705内を自由に流れる。

40

【0040】

電氣的及び液圧的に絶縁されたストリップ705にリチウムを封じ込める理由は、タイル710の表面上に液体リチウムの平行な「ワイヤ」の配列を作るためである。ワイヤ705は、リチウムチャンネル705が十分に確定された領域と方向に電流を運ぶように印加される電圧を有する。このチャンネル構成により、リチウム内の電流はタイル710に隣接するプラズマ770に制御された磁場を生成することができる。

【0041】

50

図7では、タイル710に、タイル710のリチウムの供給730及び排出740を可能にするプレナム780、790又は配管の一種が取り付けられていることがわかる。供給配管780及び排出配管790は、それぞれ電圧源760に接続されており、電気回路の一部となっている。このように、供給プレナム780および排出プレナム790は相互にまた周囲から電氣的に絶縁されるように製造される。

【0042】

動作中、液体リチウムは熱的に調節されているが、電氣的に絶縁された貯蔵容器（図示せず）に集積される。リチウムはポンプ（図示せず）によって貯蔵容器から供給配管780に汲み上げることによって、又は貯蔵容器内のリチウムの上方の空間でガスを加圧することによって、貯蔵容器から汲み上げられる。供給配管780の最初部分750は外界から電氣的に絶縁されているか、セラミックチューブなどの絶縁材料で製造される。タイル710の液圧的経路のある点で、供給配管780のセクション755は金属などの導電性材料で製造され、電源760（例えば、この図に示したような可変な電圧源760）に電氣的に接続されている電源760はリチウムに投入される電流を供給する。電気の基点から、供給配管780の最終部分765は絶縁されており、タイル710の内部へ液体リチウムを運ぶ。

【0043】

タイル710に流入した後、液体リチウムはタイル710の平行なチャンネル705を流れる。チャンネル705内部の液体リチウムの流れる方向はこの図の矢印450で示されている。液体リチウムは次に帰還配管790に入る。この配管790は大部分が絶縁されている（すなわち、領域775及び795）が、1つの導電部分785を有し、電気回路の帰還経路に接続される（すなわち、電源760の他方の端子に接続される）。電氣的な帰還点が設備の接地電位にある場合には、リチウムは任意の熱交換器に入ること、又はリチウムを供給用貯蔵容器（図示せず）に再投入可能となる前に必要とされるフィルタ処理／洗浄処理に入ることができる。供給用貯蔵容器へのリチウムの再投入は、リチウムの投入（接地電位で行われる）が接地電位にある貯蔵容器の投入口と貯蔵容器の底にある液体リチウム（タイル710への投入の電位にある）との間に導電経路を形成することがないよう、滴下などの幾つかの手段によって行うことが必要となる。絶縁パイプに流入するリチウムに絶縁障壁（すなわち、泡）を挿入する圧縮空気処理はまた、リチウムが絶縁パイプの壁を濡らさないかぎり、滴下によって実現される電気絶縁と同様に、流入するリチウムと流出するリチウムとの間に電気絶縁を実現することが可能である。

【0044】

リチウムの電気回路が供給時に接地電位を超える電圧及び帰還時に接地電位を下回る電圧から動作する場合など、電氣的な帰還点が設備の接地電位にない場合には、電氣的な帰還点を離れるリチウムはまた、滴下などのプロセスを経なければならず、これによって戻ってくるリチウムを熱交換器並びにフィルタ処理又は洗浄機器から電氣的に絶縁する。このシステムでは、調整後、設備の接地電位にあるリチウムは、前の方法で行ったように、供給用貯蔵容器の底に到達する前に再度電気絶縁を経なければならない。

【0045】

リチウムを含むタイル710に戻ると、この特別なタイル710の設計は3つの重要な特徴を有することに注意しなければならない。この設計の第1の重要な特徴は、リチウムが満たされた領域705（すなわち、チャンネル705）とリチウムが存在しない領域720の幾何学的配置により、リチウム回路に印加される電流はすべて、印加される電圧の極性に依りて、リチウム自体の流れと平行に又は逆平行に流れざるを得ない点にある。この設計の第2の重要な特徴は、反応炉のプラズマに対向する壁の表面上の閉じたリングに一連のタイル710を配置することによって、タイル710のすべての電流によって生成される局所磁場を加算することによって、プラズマ770の操作に使用しうる最終的に大きな磁場が生成される点にある。この設計の第3の重要な特徴は、プラズマ制御電磁石（例えば、電磁石コイル）とプラズマ770（図10、11、及び12を参照）との間にタイル710が配置される場合には、タイル710の表面電流経路はプラズマ制御磁石の電

流と向きが揃えられ、且つタイル710の表面電流と磁石の電流は平行になり、液体リチウムの電流はプラズマ制御磁石によって生成される磁場を増強し、一方で液体リチウム内に制御された外部からの印加電流がない場合には、導電性液体リチウムはプラズマ制御磁石の電流の変化に応じて逆向きになる局所的な電流を支援する点にある。

【0046】

図8は本発明の少なくとも1つの実施形態による、チャンネル705を図解する図7のタイル710の側面図である。この図では、チャンネル705は細いストリップ720によって絶縁されることが示されている。液体リチウムはチャンネル705の中を矢印740で示される方向に流れる。

【0047】

10

図9は本発明の少なくとも1つの実施形態による、互いに隣接するように実装される図7のタイル710を4個ずつ3列に並べた構成900の上面図を示している。この図では、タイル710が反応炉壁の曲面に沿って互いに隣接するように列を成して実装可能であることが示されている。この構成でタイル710を実装する場合には、プラズマ770を含む反応炉内の空洞に面したタイル710の多孔質の外表面が曲面910を形成することが示されている。

【0048】

本発明の一又は複数の実施形態では、タイル710の複数の列は反応炉チャンバの内壁の表面上に実装可能である。図9のタイル710の各列に対して示されているように、タイル710は液圧的に及び電氣的に連続して結合することが可能で、これによって、1つのタイル710の出力配管は別のタイル710の入力配管に接続され、タイル710の各列の一端は入力配管780を介して電源（図示せず）のプラス端子に接続され、タイル710の各列の対向端は帰還配管790を介して電源（図示せず）のマイナス端子に接続されることが示されている。代替的な実施形態では、1列に並んだタイル710の各々は、特定のタイル710に対して分離された専用の電源に接続可能である。何個のタイルを連続して接続できるかは、リチウムを汲み上げるのに必要な圧力、リチウムを流れる所要電流の駆動に必要な電圧、及び配管及び電気接続に関してリチウムタイル710にアクセスする難易度に応じて決まる。

20

【0049】

図10は本発明の少なくとも1つの実施形態による、図7のタイル710の背後に取り付けられた2個の磁気コイル1010を含むトロイダル核融合炉の内部が図解されている。既に説明したように、プラズマの不安定化の制御に役立つ帯電した液体リチウムと連動して作用するように、電気コイル1010は帯電した液体リチウムを含むタイル710の背後に設置される。電気コイル1010は、限定しないが、銅合金材料を含む種々の材料から製造可能である。この図では、タイル1020は背後に磁気コイル1010を取り付けないように示されている。

30

【0050】

図11は本発明の少なくとも1つの実施形態による、任意の数のタイル710、1020に沿って描かれた図10の磁気コイル1010の上面図を示している。この図では、磁気コイル1010は任意の数のタイル710の背後に帯電した液体リチウムを含むチャンネル705が設置されることが示されている。磁気コイル1010の電流の方向は矢印1030で示されている。この図では、背後に設置される磁気コイル1010を有していないタイル1020は、チャンネル705を含まない図4のタイル410の型式であることが示されている。しかしながら、他の実施形態では、背後に設置される磁気コイル1010を有していないタイル1020は、チャンネル705を有していない図4のタイル410の型式及び／又はチャンネル705を有する図7のタイル710の型式であってもよい。

40

【0051】

図12は本発明の少なくとも1つの実施形態による、図11の磁気コイル1010の上面断面図である。この図では、磁気コイル1010は、チャンネル705を含む任意の数のタイル710と反応炉チャンバの内壁1210（例えば、合金銅壁）との間に実装され

50

ることが示されている。タイル 710 のチャンネル 705 内の液体リチウムを流れる電流の向きは矢印 1220 で示されており、磁気コイル 1010 の電流の向きは矢印 1030 で示されている。

【0052】

特定の実例となる実施形態及び方法を本明細書に開示してきたが、前述の開示内容から、当業者には本発明の誠の精神及び範囲から逸脱することなく上記実施形態及び方法に変更及び修正を加えることが可能であることが理解されるであろう。その他多数の本発明の実施例があり、各例はその詳細事項においてのみ他と異なる。したがって、本発明は添付の請求項及び適用法の規則及び原理で要求される範囲にのみ制限されることを目的としたものである。

10

【符号の説明】

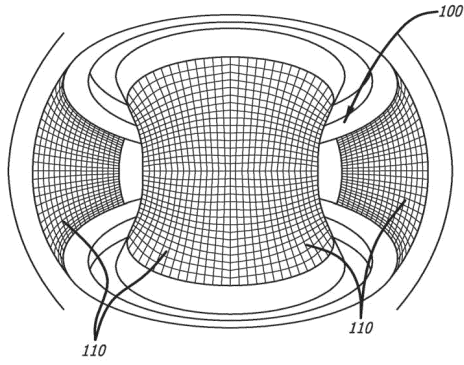
【0053】

100 核融合炉
 110、200、310、410、610、710、1020 タイル
 220、340、660、910 多孔質外表面
 230、320、670、770 プラズマ
 240 反応炉チャンバ
 250 タイルの本体
 260、430、630、780 供給プレナム
 270、450、650 液体リチウムの流れる方向
 280、440、640、790 排出プレナム
 300 タイル4個を隣接させた構成
 420、620 一様な気泡率
 510、520 タイルの側面領域
 705 チャンネル
 720 セラミックストリップ
 730 リチウムの供給
 740 リチウムの排出
 750 最初部分
 755 セクション
 760 電源
 765 最終部分
 900 タイル4個を3列に並べた構成
 1010 磁気コイル
 1030、1220 電流の向き
 1210 反応炉チャンバの内壁

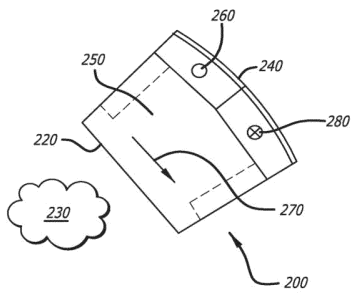
20

30

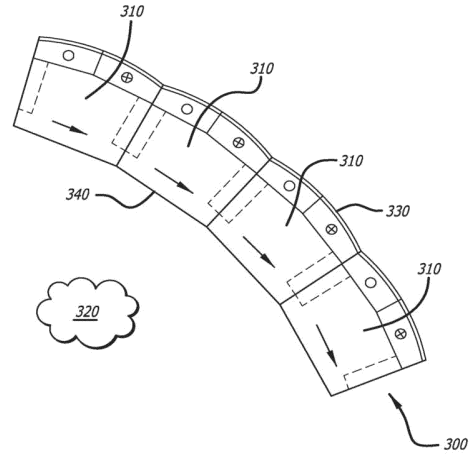
【図 1】



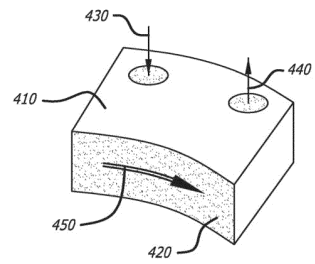
【図 2】



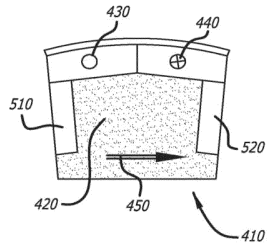
【図 3】



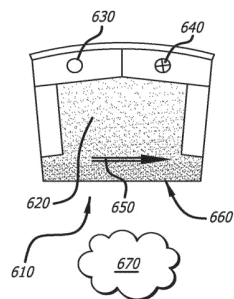
【図 4】



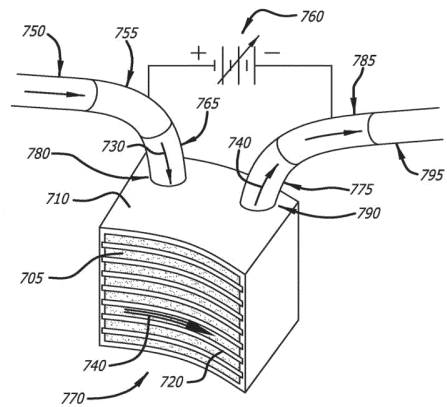
【図 5】



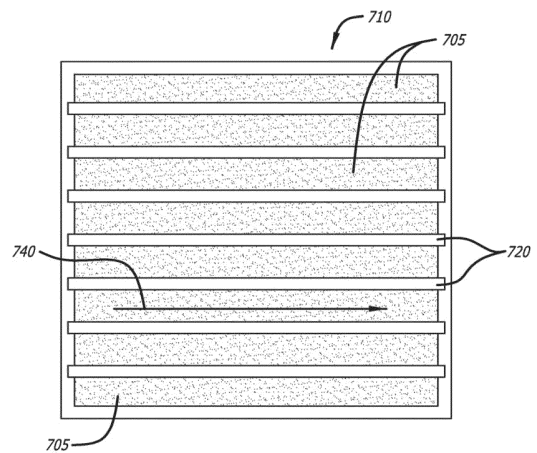
【図 6】



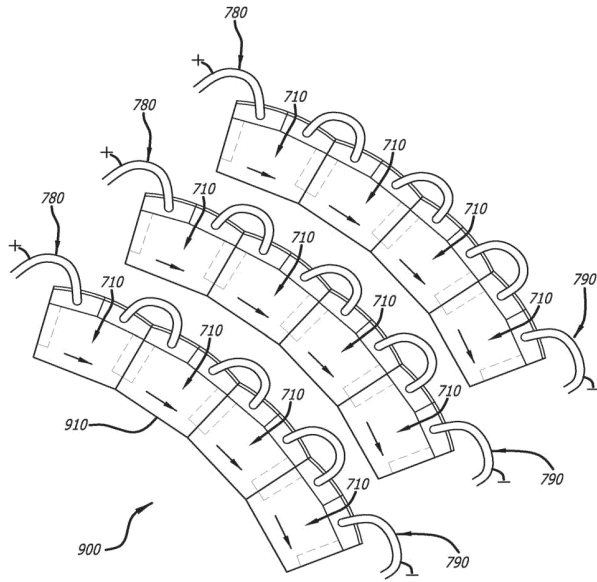
【図 7】



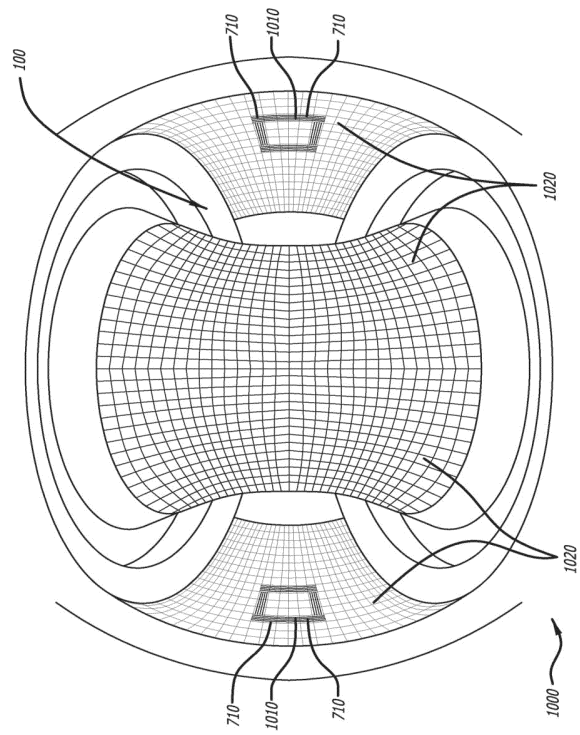
【図 8】



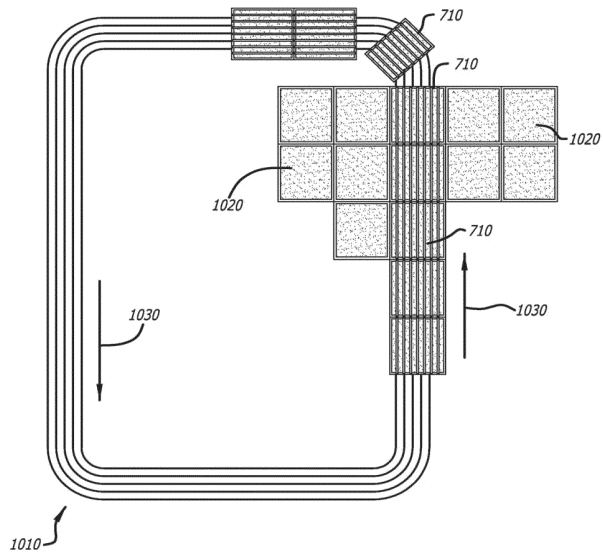
【図 9】



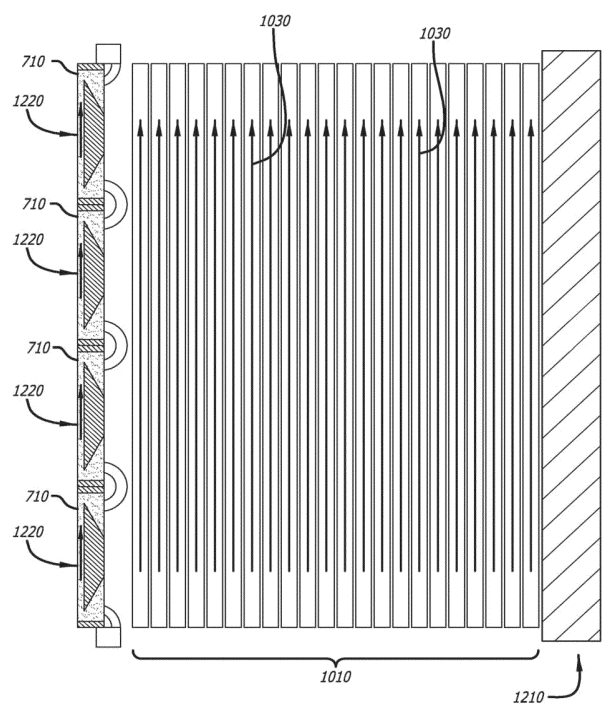
【図 10】



【図 11】



【図 12】



フロントページの続き

審査官 藤本 加代子

- (56)参考文献 特開昭58-207000 (JP, A)
米国特許第06411666 (US, B1)
米国特許第03762992 (US, A)
特開2009-175051 (JP, A)
特開2009-150709 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G21B 1/11
G21B 1/17
JSTPlus (JDreamIII)