

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7166941号
(P7166941)

(45)発行日 令和4年11月8日(2022.11.8)

(24)登録日 令和4年10月28日(2022.10.28)

(51)国際特許分類

G 2 1 B	1/05 (2006.01)	F I	G 2 1 B	1/05
H 0 5 H	1/10 (2006.01)		H 0 5 H	1/10
G 2 1 B	1/11 (2006.01)		G 2 1 B	1/11
			G 2 1 B	1/11

請求項の数 9 外国語出願 (全13頁)

(21)出願番号	特願2019-5653(P2019-5653)	(73)特許権者	504019881 ロッキード マーティン コーポレイション L O C K H E E D M A R T I N C O R P O R A T I O N アメリカ合衆国, メリーランド州 2 0 8 1 7 , ベセスダ ロックレッジ ドラ イブ 6 8 0 1 6 8 0 1 R o c k l e d g e D r i v e , B e t h e s d a , M D 2 0 8 1 7 , U . S . A .
(22)出願日	平成31年1月17日(2019.1.17)	(74)代理人	100094569 弁理士 田中 伸一郎
(65)公開番号	特開2019-124690(P2019-124690 A)	(74)代理人	100088694 弁理士 弟子丸 健
(43)公開日	令和1年7月25日(2019.7.25)	(74)代理人	100103610
審査請求日	令和3年5月18日(2021.5.18)		
(31)優先権主張番号	15/873,614		
(32)優先日	平成30年1月17日(2018.1.17)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		
早期審査対象出願			

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 超電導体を用いたプラズマ中に浸漬されている構造体の受動式磁気遮蔽

(57)【特許請求の範囲】**【請求項1】**

核融合炉であって、
 核融合プラズマ反応炉チャンバと、
 前記核融合プラズマ反応炉チャンバの内側に設けられた磁気コイル構造体と、
 前記核融合プラズマ反応炉チャンバの内側に設けられた構造的コンポーネントであって
 、前記構造的コンポーネントは、前記磁気コイル構造体を前記核融合プラズマ反応炉チャ
 ノバに結合する、前記構造的コンポーネントと、
 前記構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられた超電導材料と、
 前記構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられた複数の冷却管と、
前記複数の冷却管内に配置された冷却流体と、

前記構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられた断熱材と、
 を備える、核融合炉。

【請求項2】

前記複数の冷却管は、複数の金属管を構成している、請求項1記載の核融合炉。

【請求項3】

前記超電導材料は、超電導テープを構成している、請求項1記載の核融合炉。

【請求項4】

前記超電導材料は、複数の超電導タイルを構成している、請求項1記載の核融合炉。

【請求項5】

前記超電導材料は、前記超電導材料の超電導転移温度に等しいまたはこれよりも低い温度まで冷却される、請求項1記載の核融合炉。

【請求項6】

前記超電導材料は、前記構造的コンポーネントに侵入することによって磁場を締め出す、請求項1記載の核融合炉。

【請求項7】

前記断熱材は、近真空によって隔てられた2つの壁から成る、請求項1記載の核融合炉。

【請求項8】

前記冷却流体が、前記複数の冷却管を通って循環する、請求項1記載の核融合炉。

【請求項9】

前記核融合プラズマ反応炉チャンバ内に収容された核融合プラズマを更に有する、請求項1記載の核融合炉。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般に、プラズマの中に位置する超電導材料に関する。

【背景技術】

【0002】

超電導体は、抵抗なしで電流を流す物質である。超電導体の特有の特性は、マイスナー効果と呼ばれており、このマイスナー効果は、超電導体がこれら超電導体自体から磁場を締め出す特性である。大抵の材料は、超電導転移温度または臨界温度と呼ばれる場合のある特定の温度以下に冷却されたときにのみ超電導特性を表わす。この温度は、互いに異なる超電導材料相互間で違いのある場合があるが、一般的には、水の氷点よりもかなり低い。

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

プラズマは、イオン化されたガスである。プラズマは、イオン化され、したがって帶電しているので、電場および磁場を用いてプラズマを操ることができる。プラズマは、室温よりも高高温である場合が多く、プラズマの中には、数百万度ケルビンの温度を有するものがある。プラズマの高い温度に鑑みて、プラズマがプラズマ内に浸漬された物体またはプラズマを収容するために用いられるチャンバの壁と接触しないようにすることが望ましい場合が多い。

30

【課題を解決するための手段】

【0004】

核融合炉が核融合プラズマ反応炉チャンバを有する。磁気コイル構造体が核融合プラズマ反応炉チャンバの内側に設けられ、構造的コンポーネントもまた、核融合プラズマ反応炉チャンバの内側に設けられる。構造的コンポーネントは、磁気コイル構造体を核融合プラズマ反応炉チャンバに結合する。超電導材料が構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられる。複数の冷却チャネルが構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられる。断熱材が構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられる。

40

【0005】

プラズマ流内の構造的コンポーネントは、内部構造的コンポーネントおよびこの構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられた状態で内部構造的コンポーネントを包囲したまたはこれに隣接して位置する超電導材料を含む。複数の冷却チャネルが構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられる。断熱材が構造的コンポーネント内に少なくとも部分的に設けられる。

【0006】

プラズマ内に浸漬された物体を保護する方法が磁場を超電導材料の周りに印加するステップと、物体を包囲している超電導材料を、超電導材料が磁場を締め出すようにするのに

50

十分な温度まで冷却するステップとを含む。

【0007】

ある特定の実施形態の技術的利点としては、外部電源を必要としないで高温プラズマから構造的コンポーネントが保護されるということが挙げられる。加うるに、ある特定の実施形態は、プラズマがプラズマから熱を伝導によって除去する場合のある表面との接触を行わないようにすることによってプラズマからの熱損失を阻止することができる。幾つかの実施形態はまた、構造体を保護する能動的に電力が供給され、例えば、磁場を発生させるための電磁石を用いる方法と比較して、プラズマからの構造的コンポーネントのより完全な保護をもたらすことができる。さらに、幾つかの実施形態は、構造体をプラズマから遮蔽する能動的電力供給方法と比較して、複雑さを減少させることができる。

10

【0008】

本発明ならびにその特徴および利点のより完全な理解をもたらすため、添付の図面と関連して行われる以下の説明を参照されたい。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】ある特定の実施形態による核融合炉の一部分を示す図である。

【図2】ある特定の実施形態による超電導材料で遮蔽された構造体を示す図である。

【図3】ある特定の実施形態に従ってプラズマ内に浸漬された超電導材料で遮蔽された構造体を示す図である。

【図4】ある特定の実施形態に従ってプラズマ内に浸漬された能動的に駆動される電磁遮蔽材を備えた構造体を示す図である。

20

【図5】ある特定の実施形態に従って超電導材料を用いて物体をプラズマから遮蔽する方法を示す図である。

【図6】ある特定の実施形態に従ってプラズマ内に浸漬された超電導材料遮蔽材を備えた宇宙船を示す図である。

【図7】ある特定の実施形態に従ってプラズマ内に浸漬された超電導材料遮蔽材を備えたプローブを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

本発明の実施形態およびその利点は、図面の図1～図7を参照することによって最も良く理解され、同一の符号は、種々の図面の同一および対応した部分について用いられている。

30

【0011】

図1は、ある特定の実施形態としての核融合炉の一部分100を示している。核融合炉部分100は、核融合プラズマ反応炉チャンバ110、内部磁場コイル構造体130、および支持構造体120を含む。支持構造体120は、内部磁場コイル構造体130の構造的支持体となることができ、かかる内部磁場コイル構造体は、核融合プラズマ反応炉チャンバ110内に浮いた状態で設けられるのが良い。

【0012】

核融合プラズマ反応炉チャンバ110は、核融合プラズマを閉じ込めるのが良くかつ核融合反応が起こるようにするための密閉空間を提供することができる。核融合プラズマ反応炉チャンバ110は、支持構造体120の構造的取り付け箇所としての機能を発揮することができ、かかる構造的取り付け箇所は、内部磁場コイル構造体130を核融合プラズマ反応炉チャンバ110に固着するのが良い。核融合プラズマ反応炉チャンバ110はまた、核融合プラズマ反応を開始させ、維持し、モニタし、制御し、または停止させるのに必要な任意の数の機器またはセンサを保持するのが良い。

40

【0013】

内部磁場コイル構造体130は、核融合プラズマ反応炉チャンバ110内に収容されたプラズマを閉じ込めるとともに方向付ける磁場を発生させることができる。核融合炉100は、任意の数の内部磁場コイル構造体130を収容することができる。幾つかの実施形

50

態では、内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場は、高温プラズマを核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 の壁から遠ざけた状態に保つことができ、それにより、プラズマが核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 またはこれに取り付けられた任意の機器もしくはセンサを損傷させるのを阻止することができる。内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場はまた、核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 内に収容されたプラズマを圧縮することができる。プラズマを圧縮させることは、高温プラズマイオンが互いに接触して核融合を生じさせる可能性を高めることによって核融合を助長することができる。

【 0014 】

支持構造体 120 は、核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 内の内部磁場コイル構造体 130 の構造的支持体となることができる。幾つかの実施形態では、支持構造体 120 は、内部磁場コイル構造体 130 を核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 の壁に固着することができる。支持構造体 120 はまた、電力、冷却作用、および診断リードを内部磁場コイル構造体 130 に提供する経路となることができる。内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場は、支持構造体 120 が核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 内に収容されたプラズマに接触しないよう支持構造体 120 を保護することは可能ではない。幾つかの実施形態では、保護手段が設けられていない場合、内部磁場コイル構造体 130 により生じた磁場は、支持構造体 120 に侵入する場合があり、その結果、内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場に続くプラズマと支持構造体 120 の接触が起こる。プラズマと支持構造体 120 の接触により、支持構造体が損傷する場合があり、最終的には、プラズマの高温およびエネルギーに起因して支持構造体の破損が生じる場合がある。同様に、高温プラズマと支持構造体 120 の接触により、熱がプラズマから支持構造体 120 中に伝達される場合があり、それによりプラズマ温度が減少しかつ核融合反応がプラズマ内で起こる効率が低減する。したがって、核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 内に収容されたプラズマと支持構造体 120 の接触を阻止して支持構造体に対する損傷を阻止とともにプラズマの温度を維持することが望ましい。

【 0015 】

図 2 は、図 1 の対称軸に対して定められた半径方向に沿って見た角度から見ている受動的に遮蔽された支持構造体 120 の断面図 200 を示しており、換言すると、遮蔽支持構造体 120 中に「上から下へ」見た断面を示している。支持構造体 120 は、遮蔽構造体 210、超電導材料 220、冷却チャネル 230、冷却流体 240、および断熱材 250 を有する。

【 0016 】

遮蔽構造体 210 は、内部磁場コイル構造体 130 を核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 の壁に固着するために用いられる構造的支持体、例えばビームまたはパイプを含むのが良い。遮蔽構造体 210 は、内部磁場コイル構造体 130 用の電力および計装ケーブルのための引き回し手段を更に含むのが良い。幾つかの実施形態では、遮蔽構造体 210 は、図 1 に示された内部磁場コイル構造体 130 を冷却するためのパイプ、チャネル、または管を含むのが良い。幾つかの実施形態では、遮蔽構造体 210 は、超電導材料 220 を越えて延びる部分を含むのが良く、超電導材料 220 は、支持構造体 120 のエンベロープ内に配置されるようになっている。例えば、遮蔽構造体 210 の薄い区分は、支持構造体 120 の外部を形成し、超電導材料 220 は、遮蔽構造体 210 の薄い部分に対して内部に配置されるようになっている。別の実施形態では、材料の保護層が超電導材料をプラズマとの偶発的な接触が生じないよう保護するために超電導材料 220 に被着されるのが良い。

【 0017 】

超電導材料 220 は、遮蔽構造体 210 の十分な被覆を提供するよう配置された任意の超電導材料であって良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、遮蔽構造体 210 に被着された薄い超電導テープであるのが良い。テープ超電導材料 220 は、遮蔽構造体 210 を覆うよう遮蔽構造体 210 に巻き付けられるのが良くまたは遮蔽構造体 210 にストリップまたはパッチの状態で被着されるのが良い。幾つかの実施形態では、超電導

10

20

30

40

50

テープの層は、超電導テープの他の層とオーバーラップするのが良い。特定の実施形態では、超電導テープの多数の層を用いて電磁石中の電線の多数の巻線と同様、超電導材料 220 の適当な表面領域を提供するのが良い。

【 0 0 1 8 】

他の実施形態では、超電導材料 220 は、遮蔽構造体 210 に層の状態で被着されたタイルであるのが良い。かかる超電導タイルは、遮蔽構造体 210 がプラズマに曝されないような仕方で互いに接触した状態で配置されるのが良い。かかるタイルは、うろこまたはこけら板と同様な仕方でかつ遮蔽構造体 210 がプラズマに曝されないような仕方で互いに並んで配置されるのが良くまたは層状に配置されるのが良い。他の実施形態では、超電導材料 220 は、塗膜または粉末被覆として構造体 210 に被着されるのが良い。さらに別の実施形態では、超電導材料 220 は、核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 中への遮蔽構造体 210 の設置前または後に遮蔽構造体 210 の周りに配置されるあらかじめ製作されたシェルであるのが良い。かかる実施形態では、超電導材料 220 は、単一のシェル包囲遮蔽構造体 210 としてまたは遮蔽構造体 210 を包囲するよう組み立てられた多数の片を含むシェルとして製作されるのが良い。

【 0 0 1 9 】

幾つかの実施形態では、上述の超電導材料 220 の構成のうちの任意のものは、遮蔽構造体 210 のエンベロープ内に配置されるのが良い。例えば、超電導材料 220 は、遮蔽構造体 210 の表面の近くに配置されるのが良く、その結果、超電導材料 220 は、プラズマとの直接的な接触に至ることなく、遮蔽構造体 210 の周りの磁場を十分に締め出すことができるようになっている。

【 0 0 2 0 】

超電導材料 220 は、任意の超電導材料であって良い。選択される材料に応じて、超電導材料 220 に適した温度を有する冷却状態を選択するべきである。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、「高温」超電導体として知られている超電導体の多くの等級であるのが良い。一般に高温超電導体は、30ケルビンを超える温度で超電導を示す材料である。高温超電導体の等級の例としては、ラントンバリウム銅酸化物超電導体、タリウムバリウムカルシウム銅酸化物超電導体、ストロンチウムカルシウム銅酸化物超電導体、およびイットリウムバリウム銅酸化物超電導体を含む銅酸化物超電導体、および鉄砒素超電導体が挙げられるが、これらには限定されない。

【 0 0 2 1 】

幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、超電導材料 220 が磁界、例えば図 1 の内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場を締め出すようにするのに十分な温度まで冷却されるのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、276ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、200ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。特定の実施形態では、超電導材料 220 は、138ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。特定の実施形態では、超電導材料 220 は、30ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。他の実施形態では、超電導材料 220 は、20ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。さらに別の実施形態では、超電導材料 220 は、10ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、4ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。

【 0 0 2 2 】

超電導材料 220 は、外部磁場で、例えば内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場を締め出すのが良く、その理由は、外部磁場により外部磁場を打ち消す磁場を生じさせる電流が超電導材料 220 内に生じるからである。これら内部電流は、超電導材料 220 の表面の近くに作られるのが良い。したがって、超電導材料 220 の薄い層、例えば上述の超電導テープは、磁場を締め出すのに十分であるのが良い。超電導材料 220 は、超電導材料 220 が流すことができる内部電流の強度に対して制限およびかくして超電導材料 220 が締め出すことができる磁場の強度に対する制限を有するのが良い。

【 0 0 2 3 】

10

20

30

40

50

幾つかの実施形態では、超電導材料 220 が流すことができる内部電流、およびかくして超電導材料 220 が締め出すことができる外部磁場の強度は、超電導材料 220 の温度で決まる可能性がある。超電導材料 220 は、この超電導材料がその超電導転移温度よりも低く冷却されればされるほど、それだけ一層大きな内部電流を流すことができるとともにそれだけ一層強い磁場を締め出すことができる。例えば、超電導材料 220 は、77K まで冷却されたときに可能な電流に関して 30K まで冷却されたときの電流の 5 倍を流すことができる。したがって、幾つかの実施形態では、超電導材料 220 が核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 の内部で生じた磁場を締め出すことができるようにするのに十分な温度が維持されるようにするために超電導材料 220 の冷却状態を維持することが重要な場合がある。

10

【 0024 】

冷却チャネル 230 は、パイプ、管、通路または冷却流体 240 を超電導材料 220 の近くまで運搬する任意他の手段を含むのが良い。幾つかの実施形態では、冷却チャネル 230 はまた、内部磁場コイル構造体 130 に対して冷却作用をもたらすことができる。幾つかの実施形態では、冷却チャネル 230 は、冷却流体 240 を超電導材料 220 に直接させることができる。他の実施形態では、冷却チャネル 230 は、高い熱伝達率を持つ材料、例えば大抵の金属で構成されるのが良い。これらの実施形態では、超電導材料 220 は、冷却チャネル 230 の熱伝達率の高い材料と接触状態にあるのが良く、熱伝達率の高い材料は、熱を超電導材料 220 から冷却チャネル 230 内の冷却流体 240 に伝達する。許容可能な熱伝達率の高い材料の例としては、銅、アルミニウム、鉄、チタン、銀、金、極低温用途で用いられる任意他の金属、およびこれらの合金が挙げられるが、これらには限定されない。幾つかの実施形態では、冷却チャネル 230 は、冷却チャネル 230 の断熱を向上させるための断熱破断部を含むのが良い。

20

【 0025 】

冷却流体 240 は、任意の許容可能な液体、気体、または超電導材料 220 をその超電導転移温度以下まで冷却するのに足るほど低い温度を有する他の流体であって良い。冷却流体または気体の幾つかの例として、液体酸素、液体窒素、液体ヘリウム、液体アルゴン、液体ネオン、およびこれらの気体、または超電導材料 220 の超電導転移温度以下の温度を有する任意他の流体または気体が挙げられる。

30

【 0026 】

幾つかの実施形態では、冷却チャネル 230 は、遮蔽構造体 210 の最も近くに位置する冷却チャネル 230 の側部が断熱材料 250 で断熱されるのが良い。冷却チャネル 230 と遮蔽構造体 210 との間の断熱材は、遮蔽構造体 210 から冷却チャネル 230 中への熱の伝達を阻止することができ、したがって、遮蔽構造体 210 を冷却する冷却チャネル 230 による冷却能力の低下を阻止することによって冷却チャネル 230 の冷却能力を向上させることができる。断熱材 250 が冷却チャネル 230 および超電導材料 220 の適度の断熱を保証するよう遮蔽構造体 210 全体にわたって任意の適切な仕方で配置されるのが良い。冷却チャネル 230 相互間の断熱材は、極低温用途で用いられる断熱材の任意の形態であって良い。例えば、断熱材としては、ポリマーフォーム、エーロゲル、ガラス纖維、鉱物ウールまたは他の断熱材料が挙げられる。幾つかの実施形態では、冷却チャネル 230 と遮蔽構造体 210 との間の断熱材は、極低温流体を貯蔵するために通常用いられるジュワーびんまたはボトルで見受けられる構造に類似した二重壁式真空構造体であるのが良い。かかる構造体は、真空を含む空間によって隔てられた 2 つの壁を有するのが良く、かかる真空は、2 つの壁によって隔てられた環境相互間の断熱をもたらす。幾つかの実施形態では、断熱材 250 はまた、超電導材料 220 と遮蔽構造体 210 の表面との間に配置されても良い。かかる実施形態では、断熱材 250 は、遮蔽構造体 210 からの熱が超電導材料 220 中に伝導されるのを阻止することができ、または遅らせることができ、それにより、超電導材料が締め出すことができる磁場の強度を保つことができる。

40

【 0027 】

他の実施形態では、冷却チャネル 230 は、流体を運ぶことがなく、熱電冷却ユニット

50

であるのが良い。幾つかの実施形態では、熱電冷却機が超電導材料 220 と冷却チャネル 230 との間に配置されるのが良い。

【0028】

図 3 は、ある特定の実施形態に従ってプラズマ中に浸漬された超電導材料により遮蔽された遮蔽構造体 320 の断面 300 を示している。遮蔽構造体 320 は、超電導材料、例えば図 2 の超電導材料 220 によって遮蔽された支持構造体、例えば図 1 の支持構造体 120 であるのが良い。他の実施形態では、遮蔽構造体は、プラズマ中に浸漬された任意他の構造体または物体、例えば図 6 の宇宙船 610 または図 7 のプローブ 710 であるのが良い。遮蔽構造体 320 を遮蔽する超電導材料は、磁場、例えば内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場に曝されたときに磁場を締め出すことができる。図 3 では、磁場線 310 は、遮蔽構造体 320 の周りに押されまたは曲げられており、その理由は、超電導材料が磁場を締め出しているからである。プラズマは、帯電するので、このプラズマは、磁場線 310 に追随することができる。したがって、磁場線 310 を締め出すことによつて、超電導材料 220 は、プラズマが構造体 320 に接触するのを阻止することができる。プラズマ 330 は、任意のプラズマであつて良い。特定の実施形態では、プラズマは、図 1 の核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 内に収容されている核融合プラズマであるのが良い。超電導材料を用いて構造体 320 をプラズマから遮蔽するこの方法は、「受動的」遮蔽方式と呼ばれる場合があり、と言うのは、超電導材料が適切に冷却されている限り超電導材料が磁場を締め出すために超電導材料に供給されるのが必要な外部電力がゼロであるからである。

10

【0029】

幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、プラズマがある場合にこれが遮蔽構造体 320 に接触するのを阻止するのに十分磁場線 310 を締め出すのが良い。他の実施形態では、超電導材料 220 は、プラズマの大部分が遮蔽構造体 320 に接触するのを阻止するのに十分磁場線 310 を締め出すのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、プラズマ 330 のうちの 99.9% 超が構造体 320 に接触するのを阻止するのに十分磁場線 310 を締め出すのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、プラズマ 330 の 99% 超が遮蔽構造体 320 に接触するのを阻止するのに十分磁場線 310 を締め出すのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、プラズマ 330 の 90% 超が遮蔽構造体 320 に接触するのを阻止するのに十分磁場線 310 を締め出すのが良い。

20

【0030】

超電導材料を用いてプラズマと遮蔽構造体 320 との接触を阻止することにより、少なくとも 2 つの利点が得られる。第 1 に、高温プラズマによる遮蔽構造体 320 の損傷を阻止することができる。これは、核融合炉の破損を阻止することができ、しかも反応炉に対するメンテナンスの時間間隔を長くすることができる。第 2 に、プラズマと遮蔽構造体 320 との接触を阻止することにより、プラズマから遮蔽構造体 320 への熱損失を阻止することができ、それにより核融合反応の効率を高めることができる。超電導材料を用いて構造体 320 を受動的に遮蔽した場合の追加の利点は、超電導材料が外部磁場を締め出す能力が外部磁場のばらつきに応答して自動的にかつ迅速に調節することができるということにある。これは、図 4 を参照して以下に説明するように複雑な制御システムの必要性をなくすことができる。

30

【0031】

超電導材料により受動的に遮蔽された構造体の別の利点が図 4 に示されており、図 4 は、ある特定の実施形態による能動的に駆動される電磁遮蔽方式の構造体の断面 400 を示している。図 4 は、能動的遮蔽構造体 420、電磁石 425、外部磁場 410、遮蔽磁場 428、および遮蔽磁場ギャップ 430 を記載している。磁場を締め出す超電導材料によつて受動的に遮蔽された構造体を示す図 1 ~ 図 3 とは異なり、図 4 は、電磁石 425 によつて生じた遮蔽磁場 428 によりプラズマから遮蔽される能動的遮蔽構造体 420 を示している。

40

50

【 0 0 3 2 】

電磁石 425 によって生じた遮蔽磁場 428 は、外部磁場 410、例えば図 1 の内部磁場コイル構造体 130 によって生じる磁場を能動的遮蔽構造体 420 周りにそらすことができる。プラズマは、外部磁場線 410 に追隨することができ、かくしてこのプラズマは、遮蔽磁場 428 によって能動的遮蔽構造体 420 に接触しないようそらすことができる。

【 0 0 3 3 】

しかしながら、図 2 の超電導材料 220 とは異なり、電磁石 425 は、遮蔽磁場 428 を生じさせるために外部電源を必要とする。電磁石 425 はまた、これらが過熱するのを阻止するための冷却を必要とする場合があり、しかも超電導電磁石が電磁石 425 として用いられた場合に極低温冷却を必要とする場合がある。加うるに、遮蔽磁場 428 が外部磁場 410 に応答して作られず、これとは異なり、電磁石 425 に供給された電力によって作られるので、遮蔽磁場 428 が外部磁場 410 のばらつきを適切に補償するために制御されるようにするためには電磁石 425 を制御するためのシステムが必要とされる場合がある。かかる制御システムは、外部磁場 410 に対する変更が起こった時点と遮蔽磁場 428 に対する調節が行われた時点との間に遅延時間を有するのが良い。したがって、受動的遮蔽構造体 320 と比較した場合の能動的遮蔽構造体 420 の欠点は、能動的遮蔽構造体 420 がより複雑であるということにあり、と言うのは、この能動的遮蔽構造体が外部電力および制御システムを必要とするからであり、また、能動的遮蔽構造体 420 が受動的遮蔽構造体 320 と同じほど迅速に外部磁場の変化を補償することができない場合があるということにある。

10

【 0 0 3 4 】

能動的遮蔽構造体 420 の追加の欠点は、磁場ギャップ 430 が電磁石 425 によって生じる遮蔽磁場 428 相互間に作られる場合があるということにある。磁場ギャップ 430 は、外部磁場 410 が能動的遮蔽構造体 420 に侵入するのが阻止されない領域を作る場合がある。したがって、磁場ギャップ 430 により、外部磁場線 410 に追隨するプラズマが能動的遮蔽構造体 420 に接触することができる場合がある。本明細書における他の場所で説明したように、能動的遮蔽構造体 420 とプラズマとの接触の結果として、プラズマによる能動的遮蔽構造体 420 の損傷およびプラズマから能動的遮蔽構造体 420 への望ましくない熱損失が生じる場合がある。

20

【 0 0 3 5 】

図 5 は、ある特定の実施形態に従って超電導材料を用いて物体をプラズマから遮蔽する方法 500 を示している。図 5 は、ステップ 510 において、超電導材料を超電導転移温度まで冷却するステップ、ステップ 520 において、超電導材料を含む物体の近くにまたはこの周りに磁場を印加するステップ、およびステップ 530 において、物体をプラズマ中に浸漬させるステップを記載しており、これらについては以下に詳細に説明する。

30

【 0 0 3 6 】

ステップ 510 では、物体の表面を少なくとも部分的に包囲したまはこの近くに配置される超電導材料、例えば図 2 の超電導材料 220 をこの超電導材料に関する超電導転移温度以下の温度まで冷却するのが良い。超電導転移温度以下では、超電導材料は、電流の流れに対してゼロの内部抵抗を有することを含む超電導特性および超電導材料が配置される磁場を締め出す超電導特性を示すことができる。

40

【 0 0 3 7 】

超電導材料を冷却することは、種々の手段、例えば図 2 の冷却チャネル 230 を参照して説明した手段によって達成できる。図 2 を参照して説明したように、超電導材料が締め出すことができる磁場の強度は、超電導材料の温度で決まる可能性がある。幾つかの実施形態では、超電導材料は、超電導材料が磁場を締め出すようにするのに十分な温度まで冷却されるのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料は、276 ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料は、200 ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。特定の実施形態では、超電導材料は、138 ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。特定の実施形態では、超電導材料は、30 ケルビン以下の

50

温度まで冷却されるのが良い。他の実施形態では、超電導材料 220 は、20 ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。さらに別の実施形態では、超電導材料 220 は、10 ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。幾つかの実施形態では、超電導材料 220 は、4 ケルビン以下の温度まで冷却されるのが良い。

【0038】

ステップ 520 では、磁場がステップ 530 において形成されるプラズマを収容した空間内に作られるのが良くまたはこれに印加されるのが良い。幾つかの実施形態では、磁場、例えば図 1 の内部磁場コイル構造体によって磁場が作られるのが良い。他の実施形態では、磁場、例えば、宇宙空間を浸透する磁場が環境内に存在するのが良い。超電導材料がこの材料の超電導転移温度未満まで冷却されたときに磁場を締め出すことができるので、磁場は、物体を遮蔽する超電導材料がステップ 510 において冷却された後に物体から締め出されるのが良い。図 2 および図 3 を参照して説明したように、プラズマは、磁場に追随することができるので、超電導材料は、磁場を締め出すことによってプラズマとの接触から保護されるのが良い。

10

【0039】

ステップ 530 では、超電導材料による遮蔽が行われる物体、例えば図 2 の遮蔽構造体 230 をプラズマ中に浸漬されるのが良い。幾つかの実施形態では、ステップ 510 では、プラズマを固定状態の物体の周りに作るのが良い。例えば、核融合プラズマを、核融合炉、例えば物体、例えば図 1 の支持構造体 120 が固定状態で保持される図 1 の核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 の内側に作られるのが良い。作られるのが良いプラズマの他の例としては、プラズマ蒸着、プラズマエッティング、プラズマ重合、またはプラズマ推進エンジンもしくはイオン推進エンジンからのプラズマ排出流が挙げられる。物体を浸漬させることができるプラズマの他の例としては、宇宙空間、例えば太陽風中のプラズマが挙げられる。

20

【0040】

図 5 に順次示されているが、ステップ 510, 520, 530 は、任意の順序で実施できる。例えば、ステップ 530 において、プラズマを核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 の内側に生じさせることができ、次にステップ 510 において、物体、例えば図 1 の支持構造体 120 を遮蔽する超電導材料をその超電導温度以下の温度まで冷却するのが良く、そして最後にステップ 530 において、プラズマおよび物体を内部磁場コイル構造体 130 によって生じた磁場にさらすのが良い。変形例として、超電導材料をこの超電導材料の超電導転移温度以下の温度まで冷却する前に、磁場をプラズマに印加しても良い。

30

【0041】

超電導体により提供される遮蔽は、物体がプラズマの流れの中に浸漬されるのが良い核融合炉以外の用途でも有益な場合がある。本質的に低密度プラズマとして挙動する荷電粒子は、地球の磁場の外側に位置する宇宙全体にわたって存在する場合がある。例えば、太陽風は、低密度プラズマであると見なされる場合がある。超電導材料は、宇宙に見受けられるプラズマから宇宙船を保護することができる。加うるに、モニタ目的でプラズマ中に多くの様々なプローブを配置することができる。超電導材料は、プローブをプラズマ中に浸漬されたときの損傷から保護することができ、それによりプローブは、非遮蔽プローブよりも長い期間にわたって動作することができる。

40

【0042】

図 6 は、ある特定の実施形態に従ってプラズマ 630 内に浸漬された超電導材料遮蔽材を有する宇宙船 610 を示している。宇宙船 610 の全てまたは一部分を包囲した超電導材料は、宇宙に存在する磁場、例えば磁場 620 を締め出すことができ、しかも宇宙船 610 を宇宙に存在するプラズマ 630 があればこれからまたは荷電粒子から効果的に遮蔽することができる。かかるプラズマならびに荷電粒子は、太陽放射線、宇宙放射線、および宇宙に見受けられる任意他の形式の荷電粒子を含む場合があり、これらプラズマおよび荷電粒子は、そらされた磁場 625 の経路をたどることができる。宇宙船 610 は、惑星間空間、星間空間または銀河間空間を含む宇宙の任意の環境中で作動することができる。

50

【 0 0 4 3 】

幾つかの実施形態では、超電導材料は、宇宙船 610 の全体を包囲するのが良い。他の実施形態では、超電導材料は、宇宙船 610 の一部分、例えば人間であるクルーが生活したり作業するクルーコンパートメント、敏感な機器を収容したコンパートメント、または貯蔵コンパートメントを包囲するのが良い。他の実施形態では、超電導材料は、宇宙船 610 のエンベロープ内に配置されるのが良い。例えば、超電導材料は、宇宙船 610 の表面の近くに配置されるのが良く、その結果、超電導材料は、磁場の全てまたは大部分が宇宙船 610 に接触しないよう締め出すことができるが、宇宙船 610 の外表面とプラズマ 630 との偶発的な接触から保護されるようになっている。

【 0 0 4 4 】

図 7 は、ある特定の実施形態に従ってプラズマ 710 内に浸漬された超電導材料遮蔽材を有するプローブ 710 を示している。プローブ 710 は、任意形式のプローブまたはセンサであって良く、かかるプローブまたはセンサとしては、圧力センサ、温度センサ、フォトセンサ、アンテナ、または情報を受け取りまたは計測する任意他の装置が挙げられる。プローブ 710 は、これが浸漬されるプラズマ 730 の 1つまたは 2つ以上の特性、例えば、プラズマ 730 の温度を計測するために使用されるのが良い。しかしながら、プラズマ 730 は、プローブ 710 がプラズマ 730 との接触から保護されない場合にはプローブ 710 を損傷させる場合がある。図 2 を参照して説明した超電導材料 220 とほぼ同じ仕方によって超電導材料でプローブ 710 を包囲することにより、プローブ 710 周りの磁場、例えば磁場 720 を締め出すことができ、それにより、図 3 を参照して上述した仕方とほぼ同じ仕方でプラズマ 730 を締め出された磁場 725 に沿ってそらすことによってプローブ 710 をプラズマ 730 から保護することができる。

10

【 0 0 4 5 】

超電導材料遮蔽材を有するプローブ 710 を用いることができる環境の例としては、図 1 の核融合プラズマ反応炉チャンバ 110 内に収容された核融合プラズマ、プラズマ蒸着で用いられるプラズマ、プラズマエッチングで用いられるプラズマ、プラズマ重合で用いられるプラズマ、宇宙専用のプラズマ推進エンジンまたはイオン推進エンジンからのプラズマ排出物、または任意他の磁化プラズマ環境が挙げられる。

20

【 0 0 4 6 】

本発明の範囲から逸脱することなく本明細書において説明した方法の改造、追加、または省略を行うことができる。例えば、該当する場合にはステップを組み合わせ、改造し、または削除することができ、追加のステップを加えることができる。加うるに、ステップは、本発明の範囲から逸脱することなく、任意適当な順序で実施できる。

30

【 0 0 4 7 】

本発明を数種類の実施形態について説明したが、極めて多くの変更、変形、改変、変換、および改変が当業者には想到でき、本発明は、特許請求の範囲に記載された本発明の範囲に属するかかる変更、変形、改変、変換、および改変を含むものである。

【 符号の説明 】**【 0 0 4 8 】**

- 1 0 0 核融合炉
- 1 1 0 核融合プラズマ反応炉チャンバ
- 1 2 0 支持体
- 1 3 0 内部磁場コイル構造体
- 2 1 0 遮蔽構造体
- 2 2 0 超電導材料
- 2 3 0 冷却チャネル
- 2 4 0 冷却流体
- 2 5 0 断熱材
- 3 0 0 遮蔽支持体
- 3 1 0 , 4 1 0 磁場線

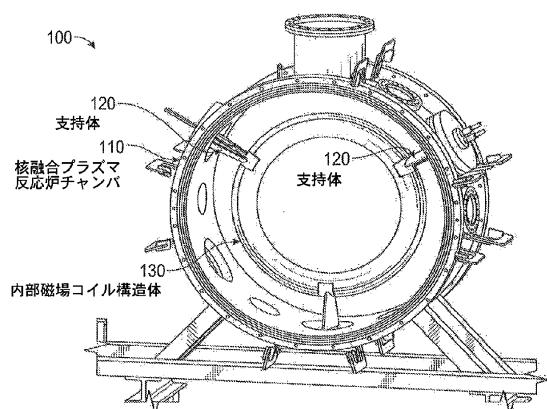
40

50

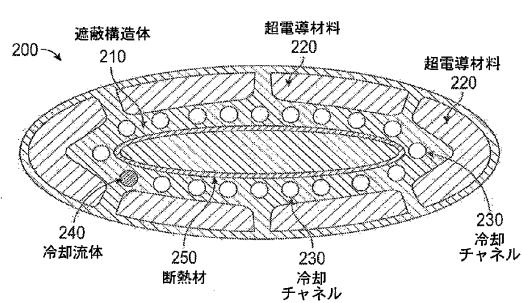
- 330 プラズマ
 420 能動的遮蔽支持体
 425 電磁石
 428 遮蔽磁場線
 430 遮蔽磁場線ギャップ
 610 宇宙船
 710 プローブ

【図面】

【図1】



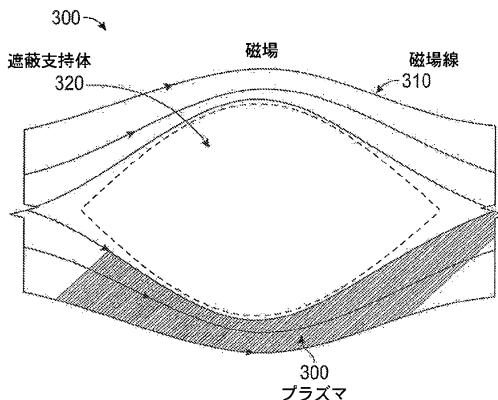
【図2】



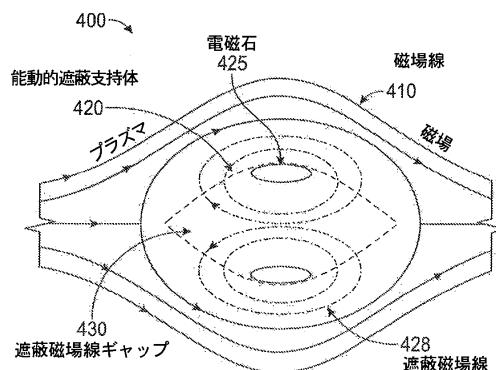
10

20

【図3】



【図4】

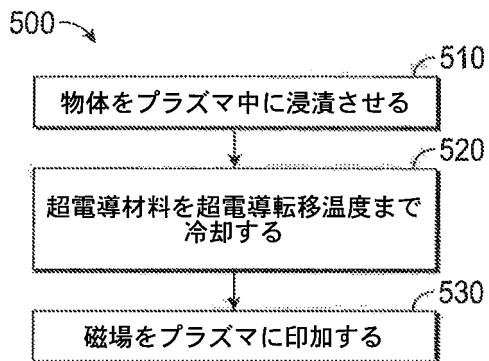


30

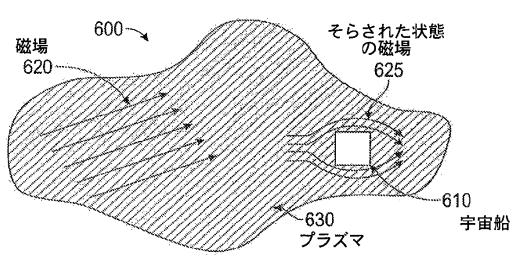
40

50

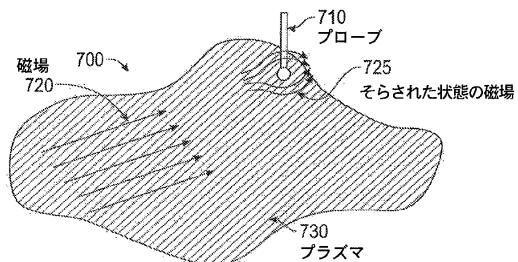
【図 5】



【図 6】



【図 7】



30

40

50

フロントページの続き

弁理士 吉田 和彦

(74)代理人 100095898

弁理士 松下 満

(74)代理人 100098475

弁理士 倉澤 伊知郎

(74)代理人 100130937

弁理士 山本 泰史

(74)代理人 100159846

弁理士 藤木 尚

(72)発明者 トマス ジェイ マグワイア

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 93551 パームデール ブーケ レーン 2726

審査官 中尾 太郎

(56)参考文献 特開平01-044888 (JP, A)

特開平01-216097 (JP, A)

特開平05-101923 (JP, A)

特開平06-249981 (JP, A)

特開平09-054179 (JP, A)

特開平10-012058 (JP, A)

特開2001-023813 (JP, A)

特開2006-108560 (JP, A)

特表2016-521358 (JP, A)

特表2016-535242 (JP, A)

米国特許出願公開第2015/0144739 (US, A1)

国際公開第2017/037471 (WO, A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G 21 B 1 / 05

H 05 H 1 / 10

G 21 B 1 / 11