(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第6466537号
(P6466537)

(45)発行日　平成31年2月6日(2019.2.6)　(24)登録日　平成31年1月18日(2019.1.18)

(51)Int.Cl.		F I		
H02K 7/02	(2006.01)	H02K	7/02	
F16H 33/02	(2006.01)	F16H	33/02	A
F16C 32/04	(2006.01)	F16C	32/04	Z
H02J 15/00	(2006.01)	H02J	15/00	A
H02K 7/09	(2006.01)	H02K	7/09	

請求項の数 7　外国語出願　(全 17 頁)　最終頁に続く

(21)出願番号　特願2017-176312(P2017-176312)
(22)出願日　平成29年9月14日(2017.9.14)
(62)分割の表示　特願2013-75845(P2013-75845)の分割
原出願日　平成25年4月1日(2013.4.1)
(65)公開番号　特開2018-33306(P2018-33306A)
(43)公開日　平成30年3月1日(2018.3.1)
審査請求日　平成29年10月13日(2017.10.13)
(31)優先権主張番号　13/438,129
(32)優先日　平成24年4月3日(2012.4.3)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　500520743
ザ・ボーイング・カンパニー
Ｔｈｅ　Ｂｏｅｉｎｇ　Ｃｏｍｐａｎｙ
アメリカ合衆国、６０６０６－２０１６
イリノイ州、シカゴ、ノース・リバーサイド・プラザ、１００
(74)代理人　110002077
園田・小林特許業務法人
(72)発明者　フル，　ジョン　アール．
アメリカ合衆国　ワシントン　９８１２４，　シアトル，　ピー．オー．　ボックス　３７０７

最終頁に続く

(54)【発明の名称】開心形フライホイール構成体

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
エネルギーを貯蔵し要求に応じて後で解放するための方法であって、
内側表面および外側表面を有する回転子を備えた、中空の実質的に円筒形の回転子組立体であって、前記回転子が約２ＧＰａ～約２０ＧＰａの引張強度を有する材料を含み、前記回転子が、約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの周方向の速度によって径方向外側に広がりうる、回転子組立体を提供することと、
固定子を含み前記回転子組立体にきわめて近接した固定子組立体を提供することと、
前記回転子の前記内側表面に少なくとも１つの可撓性の回転子磁石を固定することと、
前記固定子に固定された少なくとも１つの固定子磁石であって、静止状態においてある引力の値を有し、前記回転子が約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの周方向の速度で動作しているとき、前記回転子によって前記引力の値を実質的に維持するように、所定の幅に寸法を定められる少なくとも１つの固定子磁石を提供することと、
冷却源に接触し、前記回転子組立体を磁気的に浮揚させるための高温超伝導軸受を提供することと
を備え、前記回転子磁石および前記固定子磁石が、動作中の前記回転子の浮揚を容易にするように互いに対して位置決めされ、前記回転子組立体と前記固定子組立体が開心形の構成体に含まれる、方法。
【請求項２】
前記回転子組立体が、動作中、約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの速度に達する、請

求項１に記載の方法。
【請求項３】
前記回転子が、炭素繊維を含有する材料、ガラス繊維を含有する材料、金属を含有する材料、およびそれらの組合せからなる群から選択された材料から製造される、請求項１に記載の方法。
【請求項４】
前記材料が、グラファイト、Ｅガラス、Ｓガラス、シリカ、アルミニウム、チタン、鋼、およびそれらの組合せからなる群から選択された材料のマトリクスを含む、請求項３に記載の方法。
【請求項５】
前記炭素繊維を含有する材料が、カーボンナノチューブを含有する材料である、請求項３に記載の方法。
【請求項６】
前記材料が、多層カーボンナノチューブを含有する材料である、請求項５に記載の方法。
【請求項７】
冷却源に接触している高温超伝導軸受を提供することにおいて、前記冷却源が、
ピストンなしの一体型リニアスターリングサイクル機を含むクライオクーラであって、空気軸受を使用し摩擦ベースの故障モードがなく、約７７Ｋの冷却について約１５Ｗまで供給する、クライオクーラを含むよう構成されている、請求項１に記載の方法。

【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本開示は、フライホイールエネルギー貯蔵デバイスに関し、より詳細には、改善された安定性および性能を有する、ハブのない、すなわち開心形のフライホイール貯蔵デバイスに関する。
【背景技術】
【０００２】
エネルギーを貯蔵し、要求に応じて貯蔵されたエネルギーを解放する、フライホイールエネルギー貯蔵デバイスおよびシステムが知られている。既知のフライホイール組立体は、炭素繊維複合材料を用いて製造されることもある、旧来の回転子の設計を有する。そうした回転子は、モータ／発電機（Ｍ／Ｇ）および軸受の永久磁石（ＰＭ）が取り付けられたシャフトを有する。シャフトは従来、ハブを介してリムに接続される。シャフト－ハブ式のフライホイールの設計は、得られる上限速度の点で制限される。回転子の速度が高まるにつれて構成要素の径方向の増大量が変化するため、フライホイール組立体内の構成要素に使用可能な材料を適合させることが問題であった。ハブは、フライホイールの動作速度の範囲内で動作周波数の範囲を通じて、回転子の構造に曲げモードを導入することなくシャフトをリムに機械的に結合しなければならない。しかしながら、シャフトはしばしば、ごくわずかな径方向の増大を示し、一方、リムはかなりの径方向の増大を示す。フライホイールの動作中の構成要素の増大におけるこの不釣り合いが、フライホイールの性能を制約し、フライホイールシステムの故障を招く恐れがある。
【先行技術文献】
【非特許文献】
【０００３】
【非特許文献１】Ｍａｔｅｒｉａｌｓ Ｓｃｉｅｎｃｅ ａｎｄ Ｅｎｇｉｎｅｅｒｉｎｇ Ｂ １５１（２００８） １９５～１９８頁、Ｍ Ｓｔｒａｓｉｋ、Ｊ．Ｒ．Ｈｕｌｌ、Ｐ．Ｅ．Ｊｏｈｎｓｏｎ、Ｊ．Ｍｉｔｔｌｅｉｄｅｒ、Ｋ．Ｅ．ＭｃＣｒａｒｙ、Ｃ．Ｒ．ＭｃＩｖｅｒ、Ａ．Ｃ．Ｄａｙ、「Ｐｅｒｆｏｒｍａｎｃｅ ｏｆ ａ Ｃｏｎｄｕｃｔｉｏｎ－ｃｏｏｌｅｄ Ｈｉｇｈ－ｔｅｍｐｅｒａｔｕｒｅ Ｓｕｐｅｒｃｏｎｄ

ｕｃｔｉｎｇ　Ｂｅａｒｉｎｇ」
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００４】
本開示は、材料の増大を適合させる問題を解消し、他の方法では様々な周波数および速度で生じる径方向の増大および曲げモードの問題を未然に防ぐ、フライホイールおよびフライホイール構成体を対象にしている。より具体的には、本明細書において、シャフトーハブ構成体ではなく、「開心形の」（ハブのない）構成体を有するフライホイール組立体が開示される。
【０００５】
本開示は、高いエネルギー、高い出力密度および効率を得ると同時に、寸法分布がかなり低減された、新規な開心形フライホイールエネルギー貯蔵システムを対象にしている。本開示のフライホイール貯蔵システムは、高温超伝導（ＨＴＳ）軸受および高強度材料を含む回転子を備える。好ましい高強度材料には、それだけに限らないが、炭素繊維を含有する材料、ガラス繊維を含有する材料、金属を含有する材料など、およびそれらの組合せが含まれる。
【０００６】
本開示の作製された回転子に固有の所望される特性により、速度の著しい増加、動力の貯蔵／生成の増加、およびシステム耐久性の増大の点において、著しく改善されたフライホイールの性能が得られる。
【課題を解決するための手段】
【０００７】
本発明の一態様によれば、エネルギーを貯蔵および解放するためのフライホイール組立体が提供され、このフライホイール組立体は、内側表面および外側表面を有する回転子を有する、中空の実質的に円筒形の回転子組立体を備える。回転子は、好ましくは約２ＧＰａ～約２０ＧＰａの好ましい引張強度を有する材料を含む。固定子組立体が、回転子組立体にきわめて近接して位置決めされ、少なくとも１つの可撓性のある回転子磁石が回転子の内側表面に固定され、少なくとも１つの固定子磁石が固定子に固定される。可撓性のある回転子磁石は、ＦｅＢＮｄ粉末を含むことが好ましい。固定子磁石は、静止状態においてある引力の値を有し、回転子が約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの周方向の速度で動作しているとき、回転子によってその引力の値を実質的に維持するように、所定の幅に寸法を定められる。回転子磁石および固定子磁石は、動作中の回転子の浮揚を容易にするように互いに対して位置決めされる。フライホイール構成体は開心形の構成体であることが好ましく、回転子は動作中、その外半径において約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの速度を得ることが好ましい。
【０００８】
有利には、組立体は開心形の構成体を備える。
【０００９】
有利には、回転子は動作中、約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの速度を得る。
【００１０】
有利には、回転子は、炭素繊維を含有する材料、ガラス繊維を含有する材料、金属を含有する材料、およびそれらの組合せからなる群から選択された材料から製造される。好ましくは、材料は、グラファイト、ｅガラス、Ｓガラス、シリカ、アルミニウム、チタン、鋼、およびそれらの組合せからなる群から選択された材料のマトリクスを含む。
【００１１】
有利には、回転子は、カーボンナノチューブを含有する材料を含む。好ましくは、カーボンナノチューブを含有する材料は、多層カーボンナノチューブを含有する材料を含む。
【００１２】
有利には、可撓性のある回転子磁石は、約０．０１ＧＰａ～約２ＧＰａのヤング率を有する材料を含む。

【００１３】
有利には、可撓性のある回転子磁石は、ＦｅＢＮｄ粉末を含む。
【００１４】
本発明の他の態様によれば、開心形フライホイール組立体に使用するためのフライホイール回転子が提供され、前記回転子は約２ＧＰａ～約２０ＧＰａの引張強度を備え、前記回転子は、約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの周方向の速度で径方向外側に広がることができる。
【００１５】
有利には、回転子は、炭素繊維を含有する材料、ガラス繊維を含有する材料、金属を含有する材料、およびそれらの組合せからなる群から選択された材料から製造される。
【００１６】
有利には、材料は、グラファイト、ｅガラス、Ｓガラス、シリカ、アルミニウム、チタン、鋼、およびそれらの組合せからなる群から選択された材料のマトリクスを含む。
【００１７】
有利には、炭素繊維を含有する材料は、カーボンナノチューブを含有する材料である。
【００１８】
本発明のさらに他の態様によれば、内側表面および外側表面を有する回転子を備えた、中空の実質的に円筒形の回転子組立体を設けるステップを含む、エネルギーを貯蔵し、要求に応じて後で解放するための方法が提供される。回転子は、炭素繊維を含有する材料、ガラス繊維を含有する材料、または金属を含有する材料（またはそれらの組合せ）を含み、材料は約２ＧＰａ～約２０ＧＰａの引張強度を有する。固定子組立体が設けられ、好ましくは開心形の構成体として回転子組立体にきわめて近接して位置決めされる。少なくとも１つの可撓性のある回転子磁石が回転子の内側表面に固定され、固定子および回転子は、動作中の回転子の浮揚を容易にするように互いに対して位置決めされる。回転子は動作中、その外半径において約３００ｍ／ｓ～約３０００ｍ／ｓの周方向の速度を得ることが好ましい。炭素繊維を含有する材料、ガラス繊維を含有する材料、または金属を含有する材料は、グラファイト、Ｅガラス、Ｓガラス、シリカ、アルミニウム、チタン、鋼およびそれらの組合せからなる群から選択された材料のマトリクスを含むことが好ましい。特に好ましい材料の１つは、カーボンナノチューブを含有する材料であり、単層カーボンナノチューブを含有する材料であることが好ましい。
【００１９】
好ましい変形形態において、フライホイール組立体は、例えば航空機、宇宙機、ならびに陸上用、および水面、水面下の水上輸送用の車両などを含む有人および無人の車両など、固定された用途および移動式の用途に使用するための持続性のある動力源として特に有用である。
【００２０】
このように、本開示の変形形態を概括的な言葉で記載してきたが、次に添付図面を参照する。添付図面は、必ずしも一定の縮尺で描かれているわけではない。
【図面の簡単な説明】
【００２１】
【図１ａ】従来技術のシャフト－ハブ式フライホイール組立体の断面図である。
【図１ｂ】開心形フライホイール組立体の断面図である。
【図２】高温超伝導軸受の部分分解組立図である。
【図３】低次のハルバッハ配列の方向性のある磁化を示す格子の図である。
【図４】磁極ピッチの周方向の長さ全体に対する径方向の磁場を示すグラフである。
【図５】開心形およびシャフト－ハブ式のフライホイールの回転速度および電圧を比較したグラフである。
【図６】図１（ｂ）に示す代替のフライホイール組立体の拡大断面図である。
【図７】図１（ｂ）に示すフライホイール組立体の拡大断面図である。
【図８ａ】様々な軸受の構成および磁化の拡大断面図である。

【図８ｂ】様々な軸受の構成および磁化の拡大断面図である。
【図８ｃ】様々な軸受の構成および磁化の拡大断面図である。
【図８ｄ】様々な軸受の構成および磁化の拡大断面図である。
【図８ｅ】様々な軸受の構成および磁化の拡大断面図である。
【図９ａ】様々な軸受の構成および磁化の拡大断面図である。
【図９ｂ】様々な軸受の構成および磁化の拡大断面図である。
【図１０】ＰＭを磁化の方向と共に示す、回転子の内側表面を示す本開示の変形形態の切断図である。
【図１１】ＰＭおよび銅の導体を示す、回転子の内側表面を示す本開示の変形形態の切断図である。

【発明を実施するための形態】
【００２２】
本開示によれば、フライホイールエネルギー貯蔵デバイスにおいて所望の高いエネルギー密度を実現し、優れた成果および性能を得るために、開心形フライホイール構成体に組み込まれるいくつかの重要な技術が存在する。そうした進歩は、高強度材料から製造された回転子を組み込むこと、および高温超伝導（ＨＴＳ）軸受技術を用いて回転子を開心形の（ハブのない）フライホイール構成体に組み込むことを含む。
【００２３】
カーボンナノチューブ（ＣＮＴ）は、円筒形のナノ構造を有する炭素の同素体である。ナノチューブは、他のどの材料よりもかなり大きい、最大１３２，０００，０００：１の長さと直径の比で構成されている。こうした円筒形の炭素分子は、ナノテクノロジー、エレクトロニクス、光学、ならびに材料科学および技術の他の分野にとって価値のある独特な特性を有する。カーボンナノチューブには、その熱伝導性、ならびに機械的および電気的な特性によって、様々な構造材料に対する添加物としての用途が見出される。ナノチューブは、単層ナノチューブ（ＳＷＮＴ）および多層ナノチューブ（ＭＷＮＴ）として分類される。個々のナノチューブは自然に自己整列して、ファンデルワールス力、より具体的にはπスタッキングによって互いに保持された「ロープ」になる。
【００２４】
ＣＮＴは、最も強く堅い材料の中でも、引張強度および弾性係数の点においてさらに興味深いものである。この強度は、個々の炭素原子の間に形成される共有結合性のsp^2結合によって得られる。ＭＷＣＮＴは、約６３ギガパスカル（ＧＰａ）の引張強度を有することが検証された。例として、これは、$1mm^2$の断面積を有するケーブルに対する６４２２ｋｇに等しい重量の張力に耐えることができることを意味する。個々のＣＮＴのシェルは、最大約１００ＧＰａの強度を有する。ＣＮＴが約１．３～約１．４ｇ／cm^3の固体に対応する低い密度を有するため、最大約４８，０００$kN \cdot m \cdot kg^{-1}$であるその比強度は、例えば約１５４$kN \cdot m \cdot kg^{-1}$の比強度を有する高強度炭素鋼と比べても、既知の材料の中で最高である。
【００２５】
個々のＣＮＴのシェルの強度はきわめて高いが、隣接するシェルとチューブの間の弱い剪断相互作用が、多層カーボンナノチューブおよびカーボンナノチューブ束の有効強度の著しい低下をまねき、わずか数ＧＰａまで下がる。しかしながら、高エネルギーの電子照射を加えると、それによって内部のシェルとチューブが架橋され、こうした材料の強度を、多層カーボンナノチューブの場合には約６０ＧＰａ、２層カーボンナノチューブ束の場合には約１７ＧＰａまで効果的に高める。
【００２６】
標準的な単層カーボンナノチューブ（ＳＷＣＮＴ）は、変形せずに最大約２４ＧＰａの圧力に耐えることができる。その場合、単層カーボンナノチューブは、超硬度ナノチューブへの変化を受ける。現在の実験技術を用いて測定された最大の圧力は、約５５ＧＰａである。しかしながら、こうした新しい超硬度ナノチューブは、知られてはいないが、さらに高い圧力において崩壊する。

【００２７】
多層カーボンナノチューブ（ＭＷＣＮＴ）は、互いに正確に入れ子状に重ねられた複数の同心のナノチューブである。こうしたＣＮＴは、際立った伸縮特性を示し、そのため、内側のナノチューブのコアは、ほとんど摩擦を伴わずに外側のナノチューブのシェルの中を滑ることが可能であり、したがって、原子による完全なリニア軸受または回転軸受をもたらす。
【００２８】
本開示によれば、ＣＮＴが複合材料の回転子の製造に直接用いられる。約０．２ｇｍ／ｃｍ^{3}の密度を有するＭＷＣＮＴの糸は、よじれのない複合材料の構造の場合、控えめでも最低で少なくとも約４５ＧＰａの材料強度が得られると考えられる。
【００２９】
本開示の新規な回転子の作製に使用するための好ましいＣＮＴは、壁の厚さが約０．０７５ｎｍ、有効な壁の厚さが約０．３４ｎｍであり、物理的な壁の強度が約１５０～約２６０ＧＰａであることが好ましい。これにより、金属、ガラスおよび／または重合体のマトリクスの場合、直径３０ｎｍのＭＷＣＮＴについて最大約６５％の体積分率を有する好ましい材料がもたらされる。ＭＷＣＮＴの中に欠陥を生じさせると、内壁の強度が改善され、ＭＷＣＮＴのストランド間の内側のストランドの「壁」に対する機械的な負荷伝達が約２倍改善されると考えられる。
【００３０】
本開示に使用される好ましいＣＮＴは、具体的にはマトリクスにおける配向および体積分率の程度を制御し、現在知られているものよりも望ましい、完成された複合材料および生成物の物理的特性（例えば、より高い回転子の引張強度など）を与えることによって作り出される。
【００３１】
さらに、フライホイール組立体に使用されているセラミック型の磁石は、それだけに限らないが、例えばその脆性を含む固有の特徴のために、より高い回転速度（周方向の速度）では実用的ではなかった。したがって、回転するフライホイールの速度が高まると、様々な磁石のタイプが必要になる。既知のセラミック磁石は一般に、約３００ｍ／ｓ未満の周方向の速度に制限される。本開示は、回転子の材料自体がきわめて高い速度での動作時に膨張するときに膨張する能力を含めた望ましい特性を有する、可撓性のある磁石を組み込むことを企図している。好ましい可撓性のある磁石は、ＦｅＢＮｄ粉末を含む。
【００３２】
次に以下では、本開示のいくつかの変形形態を添付図面を参照してさらに詳しく説明するが、添付図面には、本開示の変形形態のすべてではなく一部を示す。実際には、本開示は多くの異なる形で具体化することが可能であり、本明細書において述べる変形形態に限定されると解釈すべきではない。むしろ、これらの例示的な変形形態は、本開示を完璧かつ完全なものとし、当業者に本開示の範囲を十分に伝えるために示される。例えば、特に指摘しない限り、あるものを第１、第２などと参照しても、特定の順序を意味すると解釈すべきではない。また、あるものが何か他のものの「上」にあると記載されることがあるが、特に指摘しない限り、そうではなく「下」にあってもよく、逆もまた同様である。同様に、あるものが何か他のものの左側にあると記載されても、そうではなく右側にあってもよく、逆もまた同様である。全体を通して、類似の参照番号は類似の要素を指す。
【００３３】
図１（ａ）は、例えば様々な周波数およびより高い速度では限られた性能を示す、旧来のシャフト－ハブ式フライホイール組立体１０の断面図を示している。繊維複合材料のリム型回転子１２がハブ１４に取り付けられ、ハブ１４はシャフト１６に取り付けられる。焼結された永久磁石（ＰＭ）１５および１８が、シャフト１６に取り付けられたリフトＰＭ２０および高温超伝導体２２に引力および斥力を加える。ＰＭ２０は、支持体１７に取り付けられたように示されている。モータ／発電機（Ｍ／Ｇ）からの固定子コイル２４が、Ｍ／ＧのＰＭ２６と支持体１７の間に吊り下げられたように示されている。

【００３４】
図１（ｂ）は、本開示に従って製造されたフライホイール構成体３０の断面図を示している。この「ハブのない」開心形フライホイール構成体（一点鎖線は中心線を示す）では、弾力のある永久磁石（ＰＭ）３４、３６および３８が、繊維複合材料のリム型回転子３２に固定されたように示されている。リフト軸受の固定子ＰＭ４８、およびモータ／発電機（Ｍ／Ｇ）からの固定子コイル４２が、支持構造４３に取り付けられる。高温超伝導体（ＨＴＳ）４５が、支持体４６の近くに位置決めされる。ＰＭ４８および３４はリフト軸受を備え、要素４５および３８は固定軸受を備える。
【００３５】
本開示の開心形の構成体は、繊維複合材料のリムおよびＨＴＳ軸受が、シャフト－ハブ式フライホイールの設計に固有である構成要素の径方向の増大量の相違に関する設計の制限を伴うことなく、最大の性能を得ることを可能にする新規な設計を与える。開心形フライホイール３０全体が、示された垂直の向きで真空チャンバ（図示せず）の中に収容されることが理解される。好ましい垂直の向きでは、リング形の回転子３２が、一方の端部、すなわち「頂部」にリフト軸受のＰＭ４８および３４を、もう一方の端部、すなわち「底部」にＨＴＳの固定軸受４５および３８を備える受動的に安定な磁気軸受によって吊り下げされることが好ましい。好ましくは、ブラシレスＰＭモータ／発電機３６および４２が、回転子の内外に動力を送達する。図１（ｂ）に示すように、回転子ＰＭ３４、３６および３８は、回転子３２の内側表面３３に沿って位置決めされる。本開示によれば、こうしたＰＭは、壊れることなく、あるいは構造健全性または性能を損なうことなく、フライホイールの径方向の増大、すなわち「寸法の拡大」に適応するように、十分に可撓性のあるものでなければならない。したがってＰＭは、約０．０１ＧＰａ～約２ＧＰａの範囲内の比較的低いヤング率を有することが望ましい。こうした磁石の例示的な材料には、ゴムの中に分散させたＦｅＢＮｄ粉末を含有するものが含まれる。小型クライオクーラ（図示せず）のコールドヘッドは、約３０Ｋ～約９０Ｋ、好ましくは約６０Ｋの所望の温度を維持するために、ＨＴＳの固定軸受４５に熱伝導する。小型のターボモレキュラポンプまたはゲッタ式サブリメーションポンプ（図示せず）が、チャンバの内側の真空を維持する。
【００３６】
ＨＴＳ軸受の使用は本開示に重要であり、それによって、フライホイールの回転子が高速で回転し、開心形の構成体の利点を利用することが可能になる。ＨＴＳ軸受は、ＨＴＳの構成要素の温度が８０Ｋ未満にとどまる限り、依然として受動的に安定である。ＨＴＳの熱容量をＨＴＳへの低い熱漏出と組み合わせることによって、安定性を保ち、軸受を作動させるのに十分な低い温度を維持することができる。
【００３７】
これまでに知られているＨＴＳ軸受では、ＨＴＳの要素が液体窒素に浸されていた。進歩的なＨＴＳ軸受では、液体寒剤は不要である。図２は、低温冷却を含む、本開示によるシステム６０のＨＴＳ部を概略的に示している。クライオクーラ６４はコールドヘッド６６を備える。コールドヘッド６６はケーブル６８に接続し、ケーブル６８は可撓性とすることができ、また低温において熱導体として働くことが好ましい。ケーブルは、銅、銅合金、アルミニウム、アルミニウム合金、およびそれらの組合せなどを含むことが好ましい。ケーブル６８は、伝導ラグ７２によって、好ましくは平坦な熱伝導プレート７０に接続する。ＨＴＳの要素６２は、熱伝導プレート７０の頂部に置かれる。熱伝導プレート７０は非熱伝導プレート７４の上に置かれ、それによって支持されることが好ましい。ラグ７２は、１つまたは複数の位置で、プレート７４内の開口部を通して非熱伝導プレート７４を貫通することが好ましく、またプレート７４に接触しないことが好ましい。プレート７４は、基礎部の支持体７８に接続する非熱伝導支持体７６によって機械的に接続される。システムの低温部は、放射によるシステムへの熱の入力を低減するために、低い放射率を有する１つまたは複数の薄膜のシート（図示せず）で包み込むことができる。
【００３８】
この構成は、Ｍａｔｅｒｉａｌｓ Ｓｃｉｅｎｃｅ ａｎｄ Ｅｎｇｉｎｅｅｒｉｎｇ

Ｂ　１５１（２００８）　１９５～１９８頁、Ｍ　Ｓｔｒａｓｉｋ、Ｊ．Ｒ．Ｈｕｌｌ、Ｐ．Ｅ．Ｊｏｈｎｓｏｎ、Ｊ．Ｍｉｔｔｌｅｉｄｅｒ、Ｋ．Ｅ．ＭｃＣｒａｒｙ、Ｃ．Ｒ．ＭｃＩｖｅｒ、Ａ．Ｃ．Ｄａｙ、「Ｐｅｒｆｏｒｍａｎｃｅ　ｏｆ　ａ　Ｃｏｎｄｕｃｔｉｏｎ－ｃｏｏｌｅｄ　Ｈｉｇｈ－ｔｅｍｐｅｒａｔｕｒｅ　Ｓｕｐｅｒｃｏｎｄｕｃｔｉｎｇ　Ｂｅａｒｉｎｇ」に報告されている、５ｋＷｈ、３ｋＷｈのフライホイール組立体に使用される超伝導の固定軸受の固定子の構成要素と同様である。実験に基づく軸受損失の値によって示されるように、ＨＴＳの要素の下に銅のサーマルバスが存在すると、軸受損失はあまり増加しない。ギャップは、フライホイールの回転子磁石の底部とＨＴＳ結晶の頂部との間の距離である。ＨＴＳ軸受の場合、約２ｍｍ～約４ｍｍのギャップが好ましい。ＨＴＳ軸受における回転損失は（ΔＢ）^{3}／Ｊｃに比例するが、ΔＢは回転方向で測定されたＰＭの構成要素の磁場の不均質性であり、ＪｃはＨＴＳにおける臨界電流密度である。

【００３９】

本開示の他の変形形態によれば、ＨＴＳ軸受が最適に動作するように、軸受の固定子部を、好ましくは約８０Ｋより低い、より好ましくは約３０Ｋ～約８０Ｋの低温に保たなければならない。これは、バルクのＨＴＳに対する支持基部とクライオクーラのコールドヘッドとの間に、高い熱コンダクタンスを有する可撓性のある機械的接続部を設けることによって実施される。本開示の好ましいフライホイールシステムに含まれるように企図された１つの好ましいクライオクーラは、Ｓｕｎｐｏｗｅｒ　Ｃｒｙｏｔｅｌ（商標）（ＳｕｎＰｏｗｅｒ　Ｉｎｃ．、オハイオ州アセンズ）である。好ましいクライオクーラは、空気軸受を使用し、かつ摩擦ベースの故障モードのない、ピストンなしの一体型リニアスターリングサイクル機であり、約７７Ｋの冷却について最大約１５Ｗを供給する能力を有する。さらに、好ましいクライオクーラは、冷却を低減する必要があるときに入力を抑える能力を有し、またフライホイールの各サイズに対するＨＴＳ軸受に最大約１００ＫＷｈの冷却を可能にすべきある。

【００４０】

本開示によれば、Ｍ／Ｇは、モータモードにおいて電流がタイミングを合わせた形で固定子コイルを通過し、回転子ＰＭの磁場と相互作用してトルクを発生させる点において、従来の径方向ギャップのブラシレス設計として働く。発電機モードでは、回転するＰＭの磁束が固定子コイルを通り抜け、ファラデーの法則に従って電圧を発生させる。低速では、ホール効果センサが、Ｍ／ＧのＰＭからの磁場を測定して固定子電流のタイミングを制御する。高速では、コイルに対する逆の電磁場が、この制御のための入力をもたらす。従来の径方向ギャップのＭ／Ｇでは、固定子コイルは通常、ＰＭから径方向外側に配置される。しかしながら、本開示の好ましい変形形態によれば、好ましい開心形の設計では位置を逆転させ、図１（ｂ）に示すように、固定子コイルがＰＭの径方向内側に配置される。

【００４１】

本開示によれば、開心形Ｍ／ＧのＰＭは、図３に示すように、低次のハルバッハ配列として磁化される。８°のただ１つの磁極長に対する低次のハルバッハ配列の磁化が、周（ｘ）方向に示される。値「ｚ」は垂直方向を表し、「ｙ」は径方向を表す。結合された磁石のシェルが細いことによって、利用可能な束を厳しく制限することなく、かつ固定子のコアにおける所望の正弦波形を歪めることなく、周方向の磁極長が大きくなりすぎないことが決まる。磁極長は、回転子ＰＭの内側半径と固定子コイルの外側半径との間のギャップの約１０倍より大きいことが好ましい。図４に示す例示的なフライホイールに対する実験に基づく計算は、ＰＭと固定子の間に約５ｍｍのギャップを有する９０の磁極の機械が、十分な束および波形を与えることを示している。図４は、図３に示すＰＭから径方向内側５ｍｍのところでの、磁極ピッチλ全体に対する径方向の磁場を示している。そのようなＭ／Ｇの場合、好ましい最大の電気的周波数は約３０ＫＨｚである。強磁性のコアなしのリッツ線の巻線を備えた固定子は、実質的な渦電流または他の寄生損を生じることなく必要な出力を供給するのに十分である。

【００４２】

回転子の高速および多数の磁極によって、高い出力密度が生成される。さらに、本開示のある特定の変形形態に従って製造されたフライホイールが比較的低い動力を要求するため、固定子の巻線の径方向の厚さは、例えば約１ｍｍ～約１０ｍｍなど比較的小さくなる。

【００４３】

本開示の開示された開心形フライホイール構成体の１つの重要な利点は、速度に伴う回転子の増大が速度の範囲を広げ、その範囲全体で、パワーエレクトロニクスによってフライホイールからエネルギーを効率的に取り出すことが可能であることである。開心形の構成体の変形形態によれば、フライホイールの速度が高まるにつれて、回転子の寸法が径方向に大きくなる。さらに、Ｍ／ＧのＰＭが移動して固定子コイルから離れるにつれて、コイルを通る磁束が減少する。これにより、フライホイールの高い方の速度範囲全体で比較的一定の電圧が得られる。その設計の外側のフライホイールに対する例示的な計算が、図５に示されている。回転子の半径は、速度を約４８，５００ｒｐｍまで高めると、約４．２ｍｍ増加する。標準的なパワーエレクトロニクスでは通常、発電機の電圧が最大設計値の約０．６～約１．０の間であるとき、フライホイールからエネルギーが除かれる可能性がある。これによって、シャフトーハブ式フライホイールからの利用可能なエネルギーは、最大運動エネルギーの６４％に制限される。図５において理解されるように、本開示の変形形態の開心形の設計では、約１５，０００ｒｐｍより高い速度で最大電圧の６０％を利用することができ、負荷に対して最大運動エネルギーの９０％超を利用することができる。図５に示す例では、約４０，０００ｒｐｍで最大電圧が生じ、約４０，０００ｒｐｍを超える速度ではわずかに減少する。

【００４４】

図６は、中心線１０２を中心にして同心の開心形フライホイール１００を示している。フライホイールは、回転子１１０および固定子１２０を備える。回転子１１０は、繊維複合材料のリム１１２、上側の固定軸受の永久磁石（ＰＭ）１１４、下側の固定永久磁石ＰＭ１１６、およびモータ／発電機の永久磁石（ＰＭ）の配列１１８を備えることが好ましい。固定子１２０は、上側の固定軸受のＨＴＳの配列１２４、下側の固定軸受のＨＴＳの配列１２６、固定子コイル組立体１２８、ならびに機械的な支持体１３４、１３６および１３８を備える。機械的な支持体１３４は、上側の固定軸受のＨＴＳ１２４を支持する。機械的な支持体１３６は、下側の固定軸受のＨＴＳの配列１２６を支持する。機械的な支持体１３８は、固定子コイル組立体１２８を支持する。機械的な支持体１３４、１３６および１３８は、フライホイール組立体１００を囲む真空チャンバ（図示せず）にしっかり取り付けられる。支持体１３４および１３８は、互いにすぐ隣りに示されているが、そうした支持体は、互いから所望の距離を置いて配置することも可能であることが理解される。フライホイールの回転子１１０は、（回転子ＰＭ１１４および固定子のＨＴＳ１２４を備える）上側の固定軸受、ならびに（回転子ＰＭ１１６および下側の固定子のＨＴＳの配列１２６を備える）下側の固定軸受を含む、磁気軸受の構成要素によって磁気的に浮揚させる。中心線１０２のまわりの回転子１１０の回転加速度は、回転子ＰＭ１１８と固定子コイル１２８の間の電磁気的な相互作用によって得られる。機械的な支持体１３６は、ＨＴＳの配列１２６を基礎部から熱絶縁する。通常は、ＨＴＳの配列１２６と、ＨＴＳの配列１２６を例えば図２に示すクライオクーラなどの冷熱源に接続する熱絶縁構造１３６との間に配置された熱伝導構造体（図示せず）も存在する。同様に、機械的な支持体１３４は、ＨＴＳ１２４を基礎部から熱絶縁し、通常は、ＨＴＳ１２４とＨＴＳ１２４を冷熱源に接続する支持体１３４との間に位置決めされた熱伝導構造体（図示せず）が存在する。

【００４５】

図７は、開心形フライホイール１５０が中心線１５２を中心にして同心である、他の変形形態を示している。フライホイールは、回転子１６０および固定子１７０を備える。回転子１６０は、繊維複合材料のリム１６２、リフト軸受のＰＭ１６４、固定ＰＭ１６６およびモータ／発電機のＰＭの配列１６８を備える。固定子１７０は、リフト軸受のＰＭ１７４、ＨＴＳ組立体１７６、固定子コイル組立体１７８、ならびに機械的な支持体１８４

、１８６および１８８を備える。機械的な支持体１８４は、固定子のリフト軸受のＰＭ１７４を支持する。機械的な支持体１８６は、ＨＴＳの配列１７６を支持する。機械的な支持体１８８は、固定子コイル組立体１７８を支持する。機械的な支持体１８４、１８６および１８８は、好ましくはフライホイール組立体１５０を囲む真空チャンバ（図示せず）にしっかり取り付けられる。フライホイールの回転子１６０は、（回転子ＰＭ１６４および固定子ＰＭ１７４備える）リフト軸受、ならびに（回転子ＰＭ１６６および固定子のＨＴＳ１７６を備える）固定軸受を含む、磁気軸受の構成要素によって磁気的に浮揚させる。中心線１５２のまわりの回転子１６０の回転加速度は、回転子ＰＭ１６８と固定子コイル１７８の間の電磁気的な相互作用によって得られる。機械的な支持体１８６は、ＨＴＳの配列１７６を基礎部から熱絶縁する。通常は、ＨＴＳ軸受組立体１７６と、ＨＴＳ１７６を例えば図２に示すクライオクーラなどの冷熱源に接続する熱絶縁構造１８６との間に位置決めされた熱伝導構造体（図示せず）も存在する。

【００４６】

新規な開心形フライホイール組立体にリフト軸受を考慮することによって、いくつかの構成が企図される。図８は、フライホイール組立体の上側部分を示す、１つの変形形態を対象にしている。ＰＭ２０４が、複合材料のリム２０２の上側部分に取り付けられる。ＰＭ２０４の上に固定子ＰＭ２０６が垂直に配置され、機械的な支持体２０８に取り付けられる。図８（ａ）における黒い矢印は、好ましい磁化の方向を明示している。この例では、回転子２０２を重力に逆らって持ち上げるのを助ける、ＰＭ２０４に対する上向きの引力が存在する。固定子ＰＭ２０６は、回転子の複合材料のリム２０２が径方向外側に大きくなるとき、引力がほぼ均一になるように十分に幅が広くなっている。

【００４７】

代替的なリフト軸受が図８（ｂ）に示されているが、図８（ｂ）は、回転子ＰＭ２０４の下に、それから径方向内側に配置された第２の固定子ＰＭ２０７を示している。この場合、磁力は反発し、回転子ＰＭ２０４の下の固定子ＰＭ２０７の位置によって、回転子２０２に対してさらなる上向きの力が与えられることが好ましい。図８（ｃ）に示すように、さらに磁石を追加して力を高めることが可能であることが理解される。この例では、結果として生じる回転子２０２に対するさらなる上向きの力によって、固定子ＰＭ２０７と回転子ＰＭ２１０の相互作用の間に、さらなる引力が存在するようになる。また結果として生じる回転子に対する上向きの力によって、回転子ＰＭ２１０と固定子ＰＭ２１２の相互作用の間に、さらなる斥力が存在するようになる。

【００４８】

図８（ｄ）に示すように、ここで開示される他の変形形態は、垂直ではない磁化、例えば径方向の磁化などを企図したものである。図８（ｅ）は、機械的な支持体２０９に取り付けられた追加のＰＭ２０７を示している。

【００４９】

さらに本開示は、固定軸受の向きを定め、様々な配置にすることを企図している。図９（ａ）は、図６に見られるＰＭ１１６の磁化を示している。図９（ｂ）では、代替形態が、固定軸受のＰＭ３０４から径方向内側に配置されたＨＴＳ３０６を示している。この向きでは、ＰＭ３０４は径方向に磁化される。図９（ｂ）は磁化方向を径方向内側として示しているが、そうした磁化を径方向外側に方向付けることが可能であることが理解される。

【００５０】

さらに図６は、リフト軸受が第２の固定軸受に置き換えられた他の代替形態を示している。図６に示し、図３～５に関して論じたモータ／発電機のＰＭ１１８は、径方向、周方向、またはその２つの組合せである磁化を示す。図９は、モータ／発電機のＰＭが周縁部のまわりで方向を交互に変える垂直方向の磁化を有する配置を対象にした、他の企図される変形形態を示している。

【００５１】

図１０では、開心形フライホイール組立体の回転子４６０が、繊維複合材料のリム４６

２、上側のＰＭ４６４、下側のＰＭ４６６およびＰＭリング４６８を備えることが好ましい。回転子４６０が実質的に円筒形であること、ならびにＰＭ４６４、４６６および４６８が、回転子のリム４６２の内側表面の周縁全体のまわりに延びることが好ましいと思われることが理解される。中心に位置決めされたＰＭ４６８は、矢印に従って磁化されたように示され、磁化の方向は、垂直に上側または下側の方向に交互に変わる。

【００５２】

図１１は、本開示の回転子に対する代替の変形形態を示している。開心形フライホイール組立体の回転子５１０は、繊維複合材料のリム５１２、上側のＰＭ５１４、下側のＰＭ５１６、およびはしご形の銅の導体５１８を備えることが好ましい。回転子のリム５１２が実質的に円筒形であること、ならびにＰＭ５１４、５１６およびはしご形の銅の導体５１８が、回転子のリム５１２の内側表面の周縁全体のまわりに延びることが好ましいと思われることが理解される。この変形形態では、モータ／発電機の機能が、誘導モータのトポロジーによって実行されることが好ましい。

【００５３】

開心形フライホイール構成体に組み込む本開示によれば、好ましいＭＷＣＮＴを含む、著しく改善された強度／密度の比を有する回転子の材料によって、フライホイールの回転子のエネルギー密度が、現在知られている約２６４Ｗｈ／ｋｇという値から少なくとも約４７３Ｗｈ／ｋｇまで高められ、対応する繊維の引張強度の増加は約１１～約６３ＧＰａである（既知のデバイスから少なくとも約８０％の効率および強度の増加）。実際には、ＭＷＣＮＴの壁の厚さが約０．０７５ｎｍに標準化されると、少なくとも約３００ＧＰａの理論上の壁の強度が得られる。本開示によって単層ＣＮＴ（ＳＷＣＮＴ）も企図され、ＳＷＣＮＴが適切なまたはさらに優れた質量効率のよい強化を可能にすることができるため、ＳＷＣＮＴを本明細書に示す本発明のフライホイール組立体の回転子の構成要素に組み込むことが可能であることがさらに理解される。典型的なＳＷＣＮＴは、約１．３５ｎｍの直径を有する。この直径を１原子の原子間隔と共に用いると、わずか３９％というＶｆを得ることができる。３ｎｍの直径では、６０％のＶｆがもたらされる。本開示の変形形態と共に使用するのに最適なＣＮＴは、ＣＮＴの直径、得られるＶｆおよびＣＮＴ強化の効率の釣り合いを保つことが理解される。

【００５４】

本開示の好ましい変形形態によれば、ほとんどのフライホイールの回転子は、ＨＴＳ軸受によって磁気的に浮揚させる、フィラメント巻線をした繊維複合材料を含む。ＨＴＳ軸受は、ＰＭ回転子およびＨＴＳ固定子を備える。ＨＴＳ固定子の超伝導特性のために浮揚は受動的であり、有効なフィードバックまたは能動的な制御は不要である。ＨＴＳ固定子は、Ｙ－Ｂａ－Ｃｕ－Ｏ、またはＹが例えばＧｄ、Ｎｄ、Ｅｕなどの他の希土類元素で置き換えられた他の材料からなる、個々のＨＴＳ結晶の配列を含むことが好ましく、ＨＴＳ結晶は、クライオクーラのコールドヘッドへの熱伝導によって、約７０Ｋ～約８０Ｋの温度まで冷却される。好ましくは、軸受の動作に低温流体（例えば液体窒素など）は不要である。ブラシレスＭ／Ｇは、ＰＭの回転子、および好ましくは強磁性ヨークに銅の巻線を含む固定子を備える。Ｍ／Ｇの固定子の冷却は、真空チャンバの壁への熱伝導によって実施される。この機能に寄生エネルギーは不要である。エネルギーを吸収する閉じ込め用のライナが、回転するフライホイールと外側の真空シェルの間に配置される。真空チャンバと、真空チャンバの内側の固定された構成要素の両方の重量を最小に保ち、フライホイールの配列のエネルギー密度の要求を満たすことが好ましい。好ましいシステムの他の主要な構成要素には、リフト軸受、タッチダウン軸受およびパワーエレクトロニクスが含まれる。

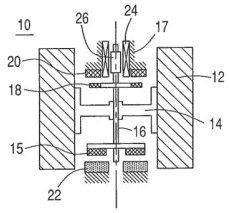
【００５５】

好ましい変形形態および代替形態を図示し記載してきたが、本開示の趣旨および範囲から逸脱することなく、それらに様々な変更および置換を行うことが可能であることが理解されるであろう。したがって、本開示の範囲は、添付の特許請求の範囲およびその等価物によってのみ限定されるべきである。

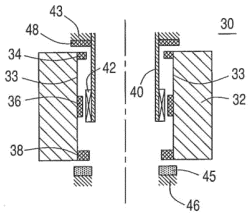
【符号の説明】
【００５６】
１０　シャフト－ハブ式フライホイール組立体
１２　繊維複合材料のリム型回転子
１４　ハブ
１５　永久磁石
１６　シャフト
１７　支持体
１８　永久磁石
２０　リフト永久磁石
２２　高温超伝導体
２４　固定子コイル
２６　モータ／発電機の永久磁石
３０　開心形フライホイール構成体
３２　繊維複合材料のリム型回転子、リング形の回転子
３３　内側表面
３４　永久磁石、リフト軸受の永久磁石、回転子永久磁石
３６　永久磁石、ブラシレス永久磁石モータ／発電機、回転子永久磁石
３８　永久磁石、高温超伝導体の固定軸受、回転子永久磁石
４２　固定子コイル、ブラシレス永久磁石モータ／発電機
４３　支持構造
４５　高温超伝導体、高温超伝導体の固定軸受
４６　支持体
４８　リフト軸受の固定子永久磁石
６０　システム
６２　高温超伝導体の要素
６４　クライオクーラ
６６　コールドヘッド
６８　ケーブル
７０　熱伝導プレート
７２　伝導ラグ
７４　非熱伝導プレート
７６　非熱伝導支持体
７８　基礎部の支持体
１００　開心形フライホイール、フライホイール組立体
１０２　中心線
１１０　回転子
１１２　繊維複合材料のリム
１１４　固定軸受の永久磁石、回転子永久磁石
１１６　固定永久磁石、回転子永久磁石
１１８　モータ／発電機の永久磁石の配列、回転子永久磁石
１２０　固定子
１２４　固定軸受の高温超伝導体の配列、固定子の高温超伝導体
１２６　固定軸受の高温超伝導体の配列、固定子の高温超伝導体の配列
１２８　固定子コイル組立体
１３４　機械的な支持体
１３６　機械的な支持体、熱絶縁構造
１３８　機械的な支持体
１５０　開心形フライホイール、フライホイール組立体
１５２　中心線

１６０　回転子
１６２　繊維複合材料のリム
１６４　リフト軸受の永久磁石、回転子永久磁石
１６６　固定永久磁石、回転子永久磁石
１６８　モータ／発電機の永久磁石の配列、回転子永久磁石
１７０　固定子
１７４　固定子のリフト軸受の永久磁石、固定子永久磁石
１７６　高温超伝導体組立体、高温超伝導体の配列、固定子の高温超伝導体、高温超伝導体軸受組立体
１７８　固定子コイル組立体
１８４　機械的な支持体
１８６　機械的な支持体、熱絶縁構造
１８８　機械的な支持体
２０２　複合材料のリム、回転子
２０４　回転子永久磁石
２０６　固定子永久磁石
２０７　固定子永久磁石
２０８　機械的な支持体
２０９　機械的な支持体
２１０　回転子永久磁石
２１２　固定子永久磁石
３０４　固定軸受の永久磁石
３０６　高温超伝導体
４６０　回転子
４６２　繊維複合材料のリム、回転子のリム
４６４　永久磁石
４６６　永久磁石
４６８　永久磁石リング
５１０　回転子
５１２　繊維複合材料のリム、回転子のリム
５１４　永久磁石
５１６　永久磁石
５１８　銅の導体

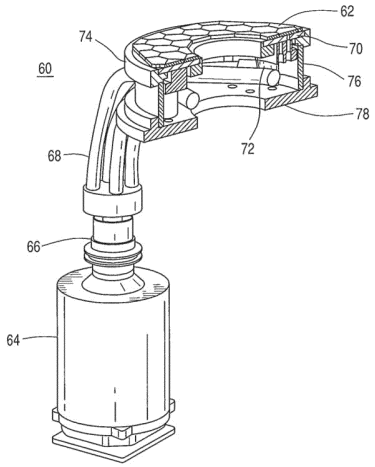
【図１ａ】



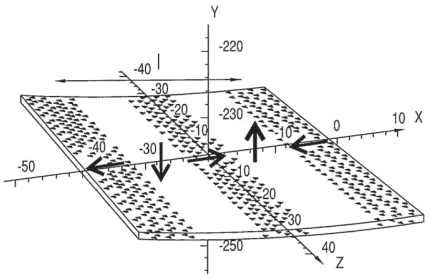
【図１ｂ】



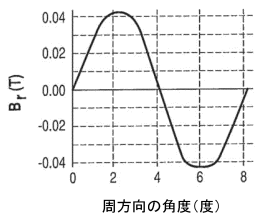
【図２】



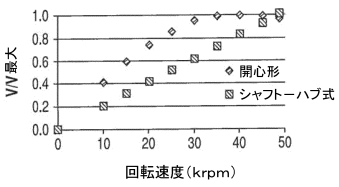
【図３】



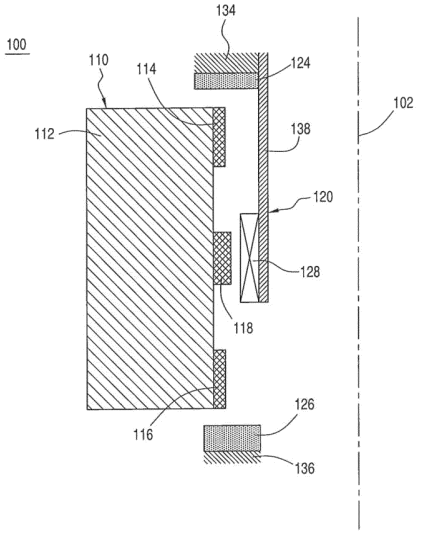
【図４】



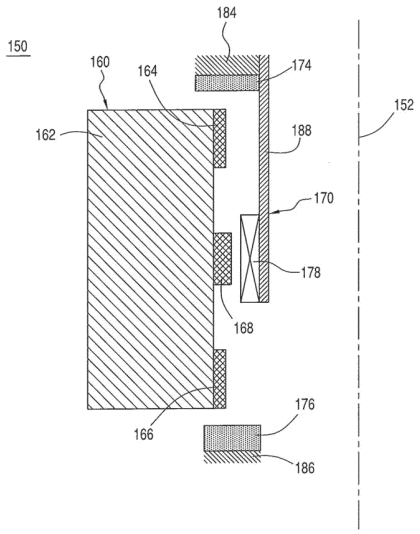
【図５】



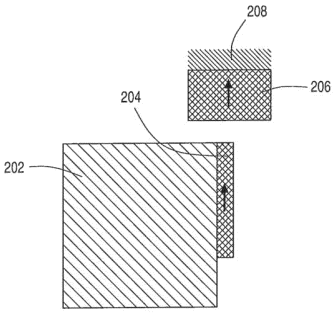
【図６】



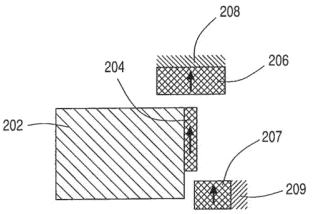
【図７】



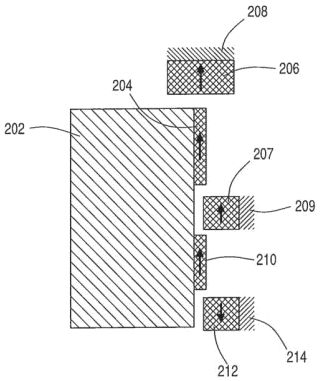
【図８ａ】



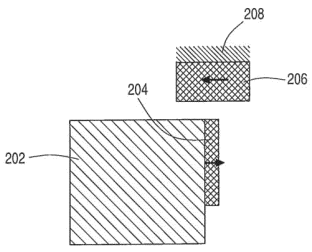
【図８ｂ】



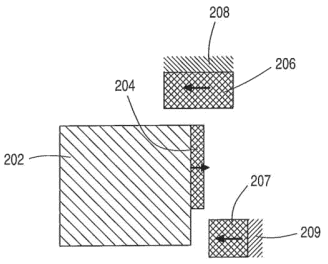
【図８ｃ】



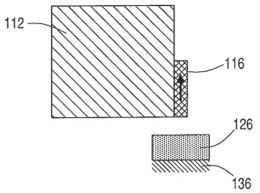
【図８ｄ】



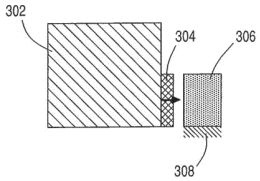
【図８ｅ】



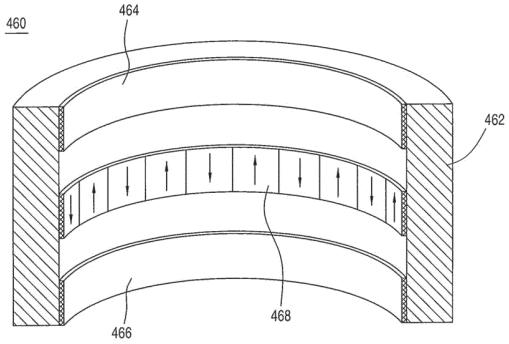
【図９ａ】



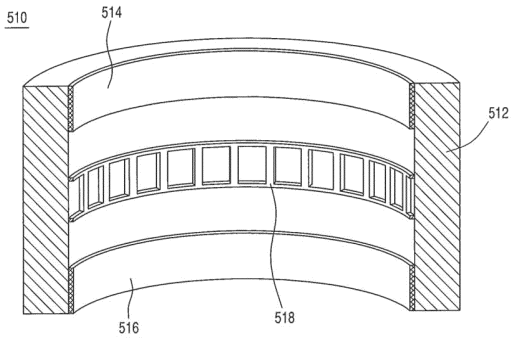
【図９ｂ】



【図１０】



【図１１】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. FI
F16F 15/31 (2006.01) F16F 15/31 H

(72)発明者 ストラシク, マイケル
アメリカ合衆国 ワシントン 98124, シアトル, ピー. オー. ボックス 3707
(72)発明者 ミットライダー, ジョン エー.
アメリカ合衆国 ワシントン 98124, シアトル, ピー. オー. ボックス 3707

審査官 大谷 謙仁

(56)参考文献 特開平11－355980（JP, A）
特開平11－311252（JP, A）
特開2010－159773（JP, A）
特表平10－507809（JP, A）
特表平09－503974（JP, A）
米国特許出願公開第2010／0203351（US, A1）
米国特許出願公開第2012／0060644（US, A1）
米国特許第05721459（US, A）
米国特許第05015940（US, A）
米国特許第04262840（US, A）
特開平04－370417（JP, A）

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02K 7／02
F16C 32／04
F16F 15／31
F16H 33／02
H02J 15／00
H02K 7／09