(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7093758号
(P7093758)

(45)発行日　令和4年6月30日(2022.6.30)

(24)登録日　令和4年6月22日(2022.6.22)

(51)国際特許分類		FI		
Ｈ０２Ｋ　7/02　(2006.01)		Ｈ０２Ｋ	7/02	
Ｆ１６Ｃ　32/04　(2006.01)		Ｆ１６Ｃ	32/04	Ｚ
Ｈ０２Ｋ　7/09　(2006.01)		Ｈ０２Ｋ	7/09	
Ｆ１６Ｈ　33/02　(2006.01)		Ｆ１６Ｈ	33/02	Ａ

請求項の数　8　外国語出願　（全22頁）

(21)出願番号　特願2019-229552(P2019-229552)
(22)出願日　令和1年12月19日(2019.12.19)
(62)分割の表示　特願2018-76621(P2018-76621)の分割
原出願日　平成25年4月2日(2013.4.2)
(65)公開番号　特開2020-78243(P2020-78243A)
(43)公開日　令和2年5月21日(2020.5.21)
審査請求日　令和2年1月14日(2020.1.14)
(31)優先権主張番号　13/438,027
(32)優先日　平成24年4月3日(2012.4.3)
(33)優先権主張国・地域又は機関
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、６０６０６－１５９６
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， シアトル， ピー．オー． ボックス ３７０７
(72)発明者　ストラシック， マイケル
アメリカ合衆国 ワシントン， シアトル， ピー．オー． ボックス ３７０７
(72)発明者　ミトライダー， ジョン エー．
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　フライホイールアセンブリのエネルギーを貯蔵および放出するための方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
要求があり次第放出するためにフライホイールアセンブリのエネルギーを貯蔵するための方法であって、
前記フライホイールアセンブリが、
真空チャンバ内の実質的に円筒形のロータアセンブリであって、複数のロータを備え、各ロータが内面および外面を有し、各ロータが異なる半径を有する、ロータアセンブリと、
少なくとも１つのステータアセンブリであって、各ステータアセンブリがロータアセンブリに近接している、ステータアセンブリと、
各ロータの前記内面に添着された少なくとも１つのロータ磁石と、
各ステータに添着された少なくとも１つのステータ磁石と、
前記ロータアセンブリおよび前記ステータアセンブリと連絡する高温超伝導軸受けとを備え、
前記フライホイールアセンブリは、前記少なくとも１つのステータアセンブリの支持体が中心軸について中空の円筒形であるオープンコアアーキテクチャを備え、前記方法が、
前記ロータアセンブリを約３００ｍ／秒から約３０００ｍ／秒の所定の速度で回転するために、電流を前記ステータアセンブリに印加することと、
動作中に前記ロータの浮揚を容易にするように前記ロータ磁石と前記ステータ磁石を互いに対して位置決めすることとを含む、方法。
【請求項２】

要求があり次第放出するためにフライホイールアセンブリのエネルギーを貯蔵するための方法であって、
前記フライホイールアセンブリが、
真空チャンバ内の実質的に円筒形のロータアセンブリであって、複数のロータを備え、各ロータが内面および外面を有し、各ロータが異なる半径を有する、ロータアセンブリと、
少なくとも１つのステータアセンブリであって、各ステータアセンブリがロータアセンブリに近接している、ステータアセンブリと、
各ロータの前記内面に添着された少なくとも１つのロータ磁石と、
各ステータに添着された少なくとも１つのステータ磁石と、
前記ロータアセンブリおよび前記ステータアセンブリと連絡する高温超伝導軸受けと、
前記高温超伝導軸受けに接続されたコールドヘッドを備える冷凍機と
を備え、
前記フライホイールアセンブリは、前記少なくとも１つのステータアセンブリの支持体が中心軸について中空の円筒形であるオープンコアアーキテクチャを備え、前記方法が、
動作中に前記ロータの浮揚を容易にするように前記ロータ磁石と前記ステータ磁石を互いに対して位置決めすることとを含む、方法。
【請求項３】
前記ロータが、黒鉛、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る材料を含む、請求項１または２に記載の方法。
【請求項４】
前記ロータが、カーボンナノチューブ含有材料を含む材料製である、請求項１ないし３のいずれか一項に記載の方法。
【請求項５】
前記カーボンナノチューブ含有材料が、シングルウォールカーボンナノチューブ含有材料を含む、請求項４に記載の方法。
【請求項６】
第１のロータが第１の方向で回転し、第２のロータが第２の方向で回転する、請求項１ないし５のいずれか一項に記載の方法。
【請求項７】
前記ロータアセンブリが、様々な半径を有する３つのロータを備え、２つのロータが第１の方向で回転し、第３のロータが第２の方向で回転する、請求項１ないし６のいずれか一項に記載の方法。
【請求項８】
前記ロータアセンブリが、様々な寸法を有するロータを備え、前記寸法が、角運動量を実質的に打ち消すように予め選択される、請求項１ないし７のいずれか一項に記載の方法。
【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レスまたはオープンコアのフライホイール貯蔵デバイスに関する。
【背景技術】
【０００２】
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は、エネルギーを貯蔵し、要求があり次第貯蔵されたエネルギーを放出することで知られている。既知のフライホイールアセンブリは、炭素繊維複合体を用いて作製されることもある従来のロータ設計を有する。そのようなロータは、モータ／発電機（Ｍ／Ｇ）と軸受け永久磁石（ＰＭ）が装着されるシャフトを有する。シャフトは、従来、ハブを介してリムに連結される。シャフト－ハブフライホイール設計は、その達成可能な上端速度の点で制限されている。フライホイールアセンブリ内の構成部品用に使用可能な材料を調和させることには問題が多い。なぜなら

、ロータ速度が上がるにつれて、これらの構成部品の半径方向の膨張が変動するからである。ハブは、フライホイールの動作スピード範囲内における動作周波数の範囲にわたってロータ構造に曲げモードを導入することなしに、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、シャフトは、しばしば無視できるほどしか半径方向の膨張を示さない一方、リムは、有意な半径方向の膨張を示す。

【０００３】

したがって、進歩し続ける材料の使用によって可能になるフライホイールにとってのより高いスピードは、残念ながらハブにとっての膨張調和問題を悪化させる。なぜなら、リムの半径方向の膨張の増大は、たとえば連結シャフトなど他の連結された構成部品が呈するどんな膨張よりも速いからである。さらに、フライホイール技術によってもたらされる全体的な効率は、材料の許容度を超えるスピードでフライホイールが動作したとき破壊される現在使用可能な材料によって制限される。

【０００４】

さらに、最大限のエネルギー貯蔵および効果的利用（ｄｅｐｌｏｙｍｅｎｔ）を達成するために高いエネルギー密度が望ましいが、既知のフライホイールアセンブリで達成可能なエネルギー密度は制限される。さらに、フライホイールシステムのエネルギー貯蔵および効果的利用の最大容量に達することは、正味の角運動量の存在によりしばしば困難であり、空間の制限により、フライホイール技術の有用性がしばしば妨げられる。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【０００５】

本開示は、材料の膨張調和問題を解消する、またそうでない場合には様々な周波数およびスピードで生じる半径方向の膨張および曲げモード問題を予防するフライホイールおよびフライホイールアーキテクチャを対象とする。より具体的には、本明細書に開示されている変形形態は、シャフト－ハブアーキテクチャではなく「オープンコア」（ハブレス）アーキテクチャを有するフライホイールアセンブリを対象とする。

【０００６】

本開示の変形形態は、高いエネルギー、電力密度、および効率を得ることになる一方、著しく縮小されたサイズプロファイルを有する新規なオープンコアフライホイールエネルギー貯蔵システムを対象とする。このフライホイール貯蔵システムは、高温超伝導（ＨＴＳ）軸受けと、高強度材料を含む複数のロータとを備える。ロータに固有の望ましい特性は、著しく高いスピード、高い蓄電／発電、および高いシステム耐久性の点で、著しく改善されたフライホイール性能をもたらす。

【０００７】

本開示によれば、エネルギー貯蔵に使用することができるフライホイールシステムおよびユニットが開示される。真空チャンバが、複数の入れ子型ロータリングまたはシリンダ（以下、「ロータ」と称する）を含み、各ロータが、独立のフライホイールとして動作する。好ましい変形形態では、ロータの少なくとも１つが逆回転ロータである。各ロータは、ロータのどちらかの端部で永久磁石（ＰＭ）リフト軸受けおよびＨＴＳ安定軸受けを構成する、受動的に安定な磁気軸受けによって懸吊されことが好ましい。ロータＰＭは、望ましくは、また予測可能に各ロータの内面に沿って配置され、小型冷凍機のコールドヘッドがＨＴＳに対して熱伝導し、望ましい動作温度を保存する。小型のターボ分子ポンプまたはゲッター－サブリメーションポンプが、アセンブリ全体を封じ込めるチャンバ内の真空を維持することが好ましい。

【０００８】

本発明の一態様によれば、真空チャンバ内に実質的に円筒形のロータアセンブリを備える、エネルギーを貯蔵および放出するためのフライホイールシステムが提供され、このアセンブリは、内面および外面を有し、好ましくはたとえば、炭素繊維、ガラス繊維、金属、およびそれらの組合せなど高強度材料を含む複数のロータを備える。各ロータは、炭素繊維含有材料、ガラス繊維含有材料、または金属含有材料（またはそれらの組合せ）を含む

ことが好ましく、その材料は、約２ＧＰａから約６０ＧＰａの引張り強度を有することが好ましい。少なくとも１つのステータアセンブリが提供され、好ましくはオープンコアアーキテクチャで、ロータアセンブリに近接して配置される。複数のロータ磁石が、ロータの内面およびステータに添着され、動作中、ロータ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。ロータは、動作中、その外半径で約３００ｍ／秒から約３０００ｍ／秒の速度を達成することが好ましい。炭素繊維含有材料、ガラス繊維含有材料、または金属含有材料は、黒鉛、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る材料のマトリクスを含むことが好ましい。１つの特に好ましい材料は、カーボンナノチューブ含有材料であり、シングルウォールカーボンナノチューブ含有材料であることが好ましい。第１のロータが第１の方向で回転し、第２のロータが第２の方向で回転する。ロータアセンブリは、様々な半径を有する３つのロータを備えることができ、２つのロータが第１の方向で回転し、第３のロータが第２の方向で回転する。ロータアセンブリは、様々な寸法を有するロータを備えることができ、それらの寸法は、角運動量を実質的に打ち消すように予め選択される。

【０００９】

各ロータは、異なる半径を有し、その結果、半径のより小さいロータを半径のより大きいロータ内に「入れ子」にすることができる。さらに、好ましいフライホイールアセンブリは、複数のステータアセンブリを備え、各ステータアセンブリは、ロータアセンブリに近接する。少なくとも１つのロータ磁石を各ロータの内面に添着し、少なくとも１つのステータ磁石を各ステータに添着し、ロータ磁石とステータ磁石が、動作中、ロータ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ようにする。

【００１０】

本発明の他の態様によれば、要求があり次第放出するためにエネルギーを貯蔵する方法であって、複数のロータを備える実質的に円筒形のロータアセンブリを備えるフライホイールアセンブリを、真空チャンバ内に設けるステップを含む方法が提供される。各ロータは、炭素繊維、ガラス繊維、金属、およびそれらの組合せなど高強度材料を含むことが好ましい。カーボンナノチューブ含有材料が特に好ましい。ロータは、炭素繊維含有材料、ガラス繊維含有材料、または金属含有材料（またはそれらの組合せ）を含み、その材料は、約２ＧＰａから約６０ＧＰａの引張り強度を有することが好ましい。ステータアセンブリが提供され、好ましくはオープンコアアーキテクチャで、ロータアセンブリに近接して配置される。少なくとも１つのロータ磁石がロータの内面およびステータに添着され、動作中、ロータ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。ロータは、動作中、その外半径で約３００ｍ／秒から約３０００ｍ／秒の速度を達成することが好ましい。炭素繊維含有材料、ガラス繊維含有材料、または金属含有材料は、黒鉛、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る材料のマトリクスを含むことが好ましい。１つの特に好ましい材料は、カーボンナノチューブ含有材料であり、シングルウォールカーボンナノチューブ含有材料であることが好ましい。第１のロータが第１の方向で回転し、第２のロータが第２の方向で回転する。ロータアセンブリは、様々な半径を有する３つのロータを備え、２つのロータが第１の方向で回転し、第３のロータが第２の方向で回転する。

【００１１】

各ロータは、異なる半径を有し、その結果、半径のより小さいロータを半径のより大きいロータ内に「入れ子」にすることができる。さらに、このアセンブリは、複数のステータアセンブリを備え、あるステータアセンブリがあるロータアセンブリに近接する。複数のロータ磁石が、各ロータの内面に添着され、複数のステータ磁石が、各ステータに添着される。次いで、電流が各フライホイールアセンブリのステータに印加され、各ロータが、動作中、その外半径で約３００ｍ／秒から約３０００ｍ／秒の速度を達成することを可能にする。

【００１２】

さらに、本開示は、真空チャンバ内に実質的に円筒形のロータアセンブリを備える、エネ

ルギーを貯蔵および放出するためのフライホイールシステムを、補助的エネルギー源または一次エネルギー源として備えるビークルを対象とし、このアセンブリが複数のロータを備え、各ロータが高強度材料を含むことが好ましい。

【００１３】

ロータはそれぞれ、動作中、それらの外半径で約３００ｍ／秒から約３０００ｍ／秒の周速を達成することが好ましい。好ましいロータは、たとえばガラス繊維、炭素繊維、金属、およびそれらの組合せなどの材料を含み、マルチウォールカーボンナノチューブ含有材料を含むカーボンナノチューブ含有材料が特に好ましい。

【００１４】

いくつかの代替形態では、本発明のフライホイールアセンブリは、航空機、宇宙機、および陸上および水上および水中ビークルを含めて、有人および無人のビークルを含む静的応用例および移動応用例で使用するための持続可能な電力源として特に有用性を有する。

【００１５】

本開示の変形形態について、このように一般的な言葉で述べたので、次に、添付の図面を参照する。これらの図面は、必ずしも原寸に比例して示されていない。

【図面の簡単な説明】

【００１６】

【図１ａ】従来技術のシャフト－ハブフライホイールアセンブリの断面図である。

【図１ｂ】オープンコアフライホイールアセンブリの断面図である。

【図２】高温超伝導軸受けの部分分解図である。

【図３】低次ハルバッハ配列の方向性の磁化を示すグリッドである。

【図４】完全な磁極ピッチ周波数にわたる半径方向磁界を示すグラフである。

【図５】オープンコアフライホイールとシャフト－ハブフライホイールの回転速さおよび電圧を比較するグラフである。

【図６】図１ｂに示されているフライホイールアセンブリの代替のクローズアップ断面図である。

【図７】図１ｂに示されているフライホイールアセンブリのクローズアップ断面図である。

【図８ａ】軸受け構成および磁化のクローズアップ断面図である。

【図８ｂ】別の軸受け構成および磁化のクローズアップ断面図である。

【図８ｃ】別の軸受け構成および磁化のクローズアップ断面図である。

【図８ｄ】別の軸受け構成および磁化のクローズアップ断面図である。

【図８ｅ】別の軸受け構成および磁化のクローズアップ断面図である。

【図９ａ】軸受け構成および磁化のクローズアップ断面図である。

【図９ｂ】別の軸受け構成および磁化のクローズアップ断面図である。

【図１０】フライホイールのオープンコアアーキテクチャ内に封じ込められた複数の入れ子型ロータを示す切断図である。

【図１１】磁化の方向と共にＰＭを示す、ロータの内面を示す切断図である。

【図１２】ＰＭおよび銅導体を示す、ロータの内面を示す切断図である。

【図１３】３つの入れ子型ロータを示す概略図である。

【発明を実施するための形態】

【００１７】

本開示によれば、オープンコアフライホイールアーキテクチャ内に組み込まれ、フライホイールエネルギー貯蔵デバイス内で望ましい高いエネルギー密度を達成し、優れた結果および性能を得るいくつかの重要な技術がある。そのような進歩は、高強度材料製のロータを組み込むこと、および高温超伝導（ＨＴＳ）軸受けを用いてオープンコアフライホイールアーキテクチャ内に複数のロータを組み込むことを含む。

【００１８】

本開示によれば、ロータは、たとえば炭素繊維含有材料、ガラス繊維含有材料、金属含有材料、およびそれらの組合せなど、高強度材料を含む。カーボンナノチューブ（ＣＮＴ）含有材料が特に好ましい。そのような材料は、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著しく大きい最大１３２，０００，０００：１の長さ対直径比で構築されている。これらの円筒形の炭素分子は、ナノテクノロジ、エレクトロニクス、光学、ならびに他の材料科学および材料技術の分野にとって価値のある独特の特性を有する。カーボンナノチューブは、それらの熱伝導性および機械的、電気的特性のために、様々な構造材料に対する添加剤として応用される。カーボンナノチューブは、シングルウォールナノチューブ（ＳＷＣＮＴ）とマルチウォールナノチューブ（ＭＣＷＮＴ）として分類される。個々のナノチューブは、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共に保持される「ロープ」の形に自然に整列する。

【００１９】

ＣＮＴは、引張り強度と弾性率の点で、それぞれこれまでに発見された最も強く最も堅い材料に入る。この強度は、個々の炭素原子間に形成されるｓｐ^{2}共有結合に起因する。ＭＷＣＮＴは、６３ギガパスカル（ＧＰａ）の引張り強度を有することが試験で示された。例示として、これは、１ｍｍ^{2}の断面を有するケーブルにかかる６４２２ｋｇに相当する重量の張力に耐える能力に置き換えられる。個々のＣＮＴシェルは、最大約１００ＧＰａの強度を有する。カーボンナノチューブは、約１．３ｇ／ｃｍ^{3}から約１．４ｇ／ｃｍ^{3}の、固体としては低い密度を有するので、最大約４８，０００ｋＮ・ｍ・ｋｇ$^{-1}$というそれらの比強度は、たとえば約１５４ｋＮ・ｍ・ｋｇ$^{-1}$の高炭素鋼に比べて、既知の材料の最良のものである。

【００２０】

個々のＣＮＴシェルの強度は非常に高いが、隣接するシェルおよびチューブ間の弱いせん断相互作用により、マルチウォール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はわずか数ＧＰａに著しく低下することになる。しかし、内部のシェルおよびチューブを架橋する高エネルギー電子照射を加えることにより、これらの材料の強度は、マルチウォールカーボンナノチューブについて約６０ＧＰａ、ダブルウォールカーボンナノチューブ束について約１７ＧＰａに事実上増大する。

【００２１】

標準的なシングルウォールカーボンナノチューブ（ＳＷＣＮＴ）は、変形なしに最大約２４ＧＰａの圧力に耐えることができる。次いで、ＳＷＣＮＴは、超硬度ナノチューブへの変換を受ける。現行の実験技法を使用して測定された最大圧力は、約５５ＧＰａである。しかし、これらの新しい超硬度ナノチューブが圧潰するのは、未知ではあるがさらに高い圧力である。

【００２２】

マルチウォールカーボンナノチューブ（ＭＷＣＮＴ）は、互いに精密に入れ子にされた複数の同心のナノチューブを有する。これらのＣＮＴは、際だった伸縮特性を示し、それにより内部のナノチューブコアがその外部のナノチューブシェル内でほとんど摩擦なしに摺動し、したがって原子的に完璧な直線軸受けまたは回転軸受けを生み出すことができる。

【００２３】

本開示によれば、複合体ロータの製造にＣＮＴが直接使用される。約０．２ｇｍ／ｃｍ^{3}の密度を有するＭＷＣＮＴヤーンは、ねじれのない複合体構造物について少なくとも約４５ＧＰａの控えめな最小材料強度を生み出すと考えられている。

【００２４】

使用される好ましいＣＮＴは、仕上げ後の複合体材料および製品に、現在知られているものより望ましい物理的特性（たとえば、より高いロータ引張り強度）を与えるように、マトリクス内の配向度および体積分率を制御することによって特別に配合される。

【００２５】

これらのロータの作製に使用するための好ましいＣＮＴは、約１５０ＧＰａから約２６０ＧＰａの物理的壁強度で、約０．０７５ｎｍの物理的壁厚、および約０．３４ｎｍの有効壁厚を有することが好ましい。これは、金属性、ガラス質、および／またはポリマー性のマトリクスで直径３０ｎｍのＭＷＣＮＴの最大約６５％の体積分率を有する好ましい材料をもたらす。ＭＷＣＮＴ内に欠陥を導入することにより、壁内強度が改善され、ＭＷＣＮ

Ｔストランドと内部ストランド「壁」との間の機械荷重伝達を約２倍改善すると考えられている。

【００２６】

本開示によれば、好ましいＨＴＳ軸受けはまた、フライホイールアセンブリの最大速度を達成することに著しく貢献する。ＨＴＳ軸受けは、ＨＴＳ構成部品の温度が依然として約８０Ｋ未満である限り、依然として受動的に安定である。ＨＴＳの熱容量により、ＨＴＳへの低い熱漏洩と相まって、冷却源を除去した後、数十分間安定性を保ち軸受けを動作させるのに十分低い温度が維持される。好ましいＨＴＳアセンブリが図２に示されている。好ましい変形形態によれば、ＨＴＳ軸受けは、ロータの直下に配置される、またクライオスタットまたは冷凍機と接触するＨＴＳ結晶を備えるステータ構成部品を備える。各結晶は、溶融組織化、単一ドメインのイットリウム・バリウム・銅酸化物（ＹＢＣＯ）ペレットである。ＹＢＣＯ構成部品は、通常、予め選択された先端対先端寸法および厚さを有する六角形として形作られる。次いで、冷凍機のコールドヘッドが、ＨＴＳ配列と接触して配置され、しばしば、銅板に接続された銅コールドフィンガにより配列に接続される。ＨＴＳ結晶は、銅板の直上に配置され、しばしば極低温用エポキシで銅板に取り付けられる。

【００２７】

次に、本開示のいくつかの変形形態について、以下、本開示のいくつかの、しかしすべてではない変形形態が示されている添付の図面を参照してより十分に述べる。実際には、本開示は、多数の様々な形態で実施することができるので、本明細書に記載の変形形態に限定されると解釈すべきではない。それどころか、これらの例示的な変形例は、この開示が徹底的かつ完全なものになるように、また本開示の範囲を当業者に十分に伝えるように提供されている。たとえば、別段示されていない限り、何らかのものを第１、第２などと呼ぶことは、特定の順序を暗示すると解釈すべきではない。また、何らかのものが別の何かの「上方」にあると述べられることがあっても、別段示されていない限り、そうではなく「下方」にあってもよく、逆も同様である。同様に、別の何かの左にあると述べられた何らかのものが、そうではなく右にあってもよく、逆も同様である。同様の符号は、全体を通じて同様の要素を指す。

【００２８】

図１ａは、たとえば様々な周波数およびより高いスピードで限られた性能を示す従来のシャフト－ハブフライホイールアセンブリ１０の断面図を示す。繊維複合体リムロータ１２がハブ１４に取り付けられ、ハブ１４は、シャフト１６に取り付けられている。シャフト１６には、焼結永久磁石（ＰＭ）１５、１８が取り付けられ、リフトＰＭ２０および高温超伝導体２２に対して吸引力および反発力を及ぼす。ＰＭ２０は、支持体１７に取り付けられて示されている。モータ／発電機（Ｍ／Ｇ）からのステータコイル２４が、Ｍ／ＧＰＭ２６と支持体１７の間に懸吊されて示されている。

【００２９】

図１ｂは、本開示に従って作製されたフライホイールアーキテクチャ３０の断面図を示す。この「ハブレス」オープンコアフライホイールアーキテクチャ（１点短鎖線は中心線を示す）では、弾性のある永久磁石（ＰＭ）３４、３６、３８が、繊維複合体リムロータ３２に添着されて示されている。リフト軸受けステータＰＭ４８およびモータ／発電機（Ｍ／Ｇ）からのステータコイル４２が、支持構造物４３に取り付けられている。高温超伝導体（ＨＴＳ）４５が、支持体４６に近接して配置されている。ＰＭ４８、３４は、リフト軸受けを構成し、要素４５、３８は、安定軸受けを構成する。

【００３０】

本開示のオープンコアアーキテクチャは、繊維複合体リムおよびＨＴＳ軸受けが、シャフト－ハブフライホイール設計に固有の、構成部品の半径方向の膨張の不釣り合いという設計制限なしに最大の性能を達成することを可能にする新規な設計を提供する。図ではその垂直の向きにあるオープンコアフライホイール３０全体が、真空チャンバ（図示せず）内に封じ込められることを理解されたい。好ましい垂直の向きでは、リング形状の繊維複合体ロータ３２が、受動的に安定な磁気軸受けによって懸吊され、一端または「上部」でリ

フト軸受け（ＰＭ４８およびＰＭ３４）を、また第２の端部または「下部」でＨＴＳ安定軸受け（ＰＭ３８およびＨＴＳ４５）を構成することが好ましい。ブラシレスＰＭモータ／発電機４０が、ロータの内外に電力を送出することが好ましい。図１ｂに示されているように、ロータＰＭ３４、３６、３８が、ロータ３２の内面３３に沿って配置されている。小型冷凍機（図示せず）のコールドヘッドがＨＴＳ安定軸受け４５に対して熱伝導し、約３０Ｋから約９０Ｋ、好ましくは約６０Ｋの望ましい温度を維持する。小型のターボ分子ポンプまたはゲッターサブリメーションポンプ（図示せず）が、チャンバ（図示せず）内の真空を維持する。

【００３１】

ＨＴＳ軸受けの使用は、本開示の代替形態にとって重要であり、フライホイールロータが高速度で回転することを可能にし、オープンコアアーキテクチャの利点を利用する。ＨＴＳ軸受けは、ＨＴＳ構成部品の温度が依然として８０Ｋ未満である限り、依然として受動的に安定である。ＨＴＳの熱容量がＨＴＳへの低い熱漏洩と相まって、安定性を保ち軸受けを動作させるのに十分低い温度を維持することができる。

【００３２】

初期の既知のＨＴＳ軸受けでは、ＨＴＳ要素が液体窒素に浸されていた。先進のＨＴＳ軸受けは、液体クライオジェンを必要としない。図２は、極低温冷却を含む、本開示によるシステム６０のＨＴＳ部を概略的に示す。冷凍機６４は、コールドヘッド６６を備える。コールドヘッド６６は、可撓性のものとすることができる、好ましくは極低温で熱伝導体として働くケーブル６８に接続する。これらのケーブルは、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により、好ましくは平坦な熱伝導プレート７０に接続する。ＨＴＳ要素６２は、熱伝導プレート７０の上部に着座する。熱伝導プレート７０は、非熱伝導プレート７４上に着座し、それによって支持されることが好ましい。ラグ７２は、１つまたは複数の場所で非熱伝導プレート７４内の開口を通ってプレート７４を貫通することが好ましく、プレート７４に触れないことが好ましい。プレート７４は、グランド支持体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。このシステムの極低温部分は、放射によるシステムへの熱入力を低減するために、低い放射率を有する１枚または複数のフィルム（図示せず）によって覆われてもよい。

【００３３】

この構成は、Ｍａｔｅｒｉａｌｓ Ｓｃｉｅｎｃｅ ａｎｄ Ｅｎｇｉｎｅｅｒｉｎｇ Ｂ １５１（２００８年）１９５～１９８、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」で報告されている５ｋＷｈ、３ｋＷフライホイールアセンブリで使用される超伝導安定軸受けのステータ構成部品と同様である。実験に基づく軸受け損失値によって示されているように、ＨＴＳ要素下に銅熱バスがあっても、軸受け損失を著しく増大することはなかった。間隙は、フライホイールロータ磁石の下部とＨＴＳ結晶の上部との間の距離である。約２ｍｍから４ｍｍの間隙がＨＴＳ軸受けに好ましい。ＨＴＳ軸受けにおける回転損失は、$(\Delta B)^3/Jc$に比例し、ここでΔＢは、回転方向で測定されたＰＭ構成部品の磁界の不均質性であり、Ｊｃは、ＨＴＳの臨界電流密度である。

【００３４】

本開示の他の変形形態によれば、ＨＴＳ軸受けが最適に動作するために、軸受けのステータ部は、好ましくは約８０Ｋ未満、より好ましくは約３０Ｋから約８０Ｋの極低温で保たれなければならない。これは、バルクＨＴＳ用の支持ベースと冷凍機のコールドヘッドとの間で高い熱コンダクタンスを有する可撓性の機械的接続を確立することによって達成される。本開示の好ましいフライホイールシステムに含めることが企図されている１つの好ましい冷凍機は、Ｓｕｎｐｏｗｅｒ Ｃｒｙｏｔｅｌ ＴＭ（ＳｕｎＰｏｗｅｒ Ｉｎｃ．、オハイオ州アセンズ）である。この好ましい冷凍機は、空気軸受けを使用し、摩擦を主

要素とする故障モードがなく、約７７Ｋで最大約１５Ｗの冷却を実現する能力を有する直線、フリーピストンの一体型スターリングサイクル機である。さらに、この好ましい冷凍機は、それほど冷却が必要とされないとき入力電力を絞る能力を有し、最大約１００ｋＷｈにサイズ設定されたフライホイール用のＨＴＳ軸受けを冷却することができるはずである。

【００３５】

本開示の他の代替形態によれば、Ｍ／Ｇは、モータモードでは電流が、ロータＰＭの磁界と相互作用しトルクを生成するように時間調節されてステータコイルを通過する点で、従来のラジアルギャップ型ブラシレス設計として機能する。発電機モードでは、回転するＰＭ磁束がステータコイルを掃引し、ファラデーの法則に従って電圧を生成する。低速では、ステータ電流のタイミングを制御するために、ホール効果センサがＭ／Ｇ　ＰＭからの磁界を測定する。高速では、コイル上の逆電磁界がこの制御のための入力を供給する。従来のラジアルギャップ型Ｍ／Ｇでは、ステータコイルは、典型的にはＰＭから半径方向外側に位置する。しかし、本開示の好ましい変形形態によれば、この好ましいオープンコア設計では、位置が逆にされ、図１ｂに示されているように、ステータコイルがＰＭの半径方向内側に位置する。

【００３６】

本開示によれば、オープンコアＭ／ＧのＰＭは、図３に示されているように、低次ハルバッハ配列で磁化される。８度の単一の極長さにわたる低次ハルバッハ配列の磁化が周（ｘ）方向で示されている。値「ｚ」は垂直方向を、「ｙ」は半径方向を表す。接着された磁石シェルの薄さにより、周方向の極長さは、使用可能な磁束を厳しく制限しステータコア内の望ましい正弦波形を歪ませることなしには、あまり大きくすることができないことになる。極長さは、ロータＰＭの内半径とステータコイルの外半径との間の間隙の約１０倍より大きくすべきである。図４に示されている、例示的なフライホイールに関する実験に基づく計算は、ＰＭとステータの間に約５ｍｍの間隙を有する９０極機が十分な磁束および波形をもたらすことを示している。図４は、図３に示されているＰＭから半径方向内側５ｍｍでの完全な磁極ピッチλにわたる半径方向磁界を示す。そのようなＭ／Ｇに好ましい最大電気周波数は、約３０ｋＨｚである。実質的な渦電流または他の寄生損を生じることなしに必要とされるパワー出力をもたらすためには、強磁性コアのないリッツ線巻線を備えるステータで十分である。

【００３７】

高速のロータおよび多数の極が、高い電力密度を生み出す。さらに、本開示のいくつかの変形形態に従って作製されるフライホイールの比較的低い電力要件の場合、ステータ巻線の半径方向の厚さは、たとえば約１ｍｍから約１０ｍｍなど、比較的小さいものである。

【００３８】

本開示のオープンコアフライホイールアーキテクチャの１つの著しい利点は、スピードに伴うロータの膨張により、パワーエレクトロニクスがフライホイールから十分にエネルギーを抽出することができるスピード範囲が著しく広がることである。本開示のオープンコアアーキテクチャによれば、ロータの寸法は、フライホイールスピードが増すにつれて半径方向に膨張する。さらに、Ｍ／ＧのＰＭがステータコイルから遠ざかるにつれて、コイルを通る磁束が減少する。これにより、フライホイールの上限スピード範囲にわたって比較的一定である電圧が生じる。この設計の外側フライホイールに関する例示的な計算が、図５に示されている。ロータ半径は、約４８，５００ｒｐｍまで増大するスピードにおいて、約４．２ｍｍだけ増大する。標準的なパワーエレクトロニクスは、一般に、発電機電圧が最大設計値の約０．６と約１．０の間にあるとき、フライホイールからエネルギーを取り出すことができる。これは、シャフト－ハブフライホイールからの使用可能なエネルギーを最大運動エネルギーの６４％に制限する。図５でわかるように、本開示のオープンコア設計では、約１５，０００ｒｐｍより高いスピードについて、最大電圧の６０％が使用可能であり、最大運動エネルギーの９０％超が、負荷に使用可能である。図５に示されている例では、最大電圧は、約４０，０００ｒｐｍで発生し、４０，０００ｒｐｍを超え

るスピードでわずかに低下する。
【００３９】
図６は、オープンコアフライホイール１００が中心線１０２周りで同心である本開示の変形形態を示す。このフライホイールは、ロータ１１０と、ステータ１２０とを備える。ロータ１１０は、繊維複合体リム１１２と、上側安定軸受け永久磁石（ＰＭ）１１４と、下側安定軸受けＰＭ１１６と、モータ／発電機ＰＭ配列１１８とを備えることが好ましい。ステータ１２０は、上側安定軸受けＨＴＳ配列１２４と、下側安定軸受けＨＴＳ配列１２６と、ステータコイルアセンブリ１２８と、機械的支持体１３４、１３６、１３８とを備える。機械的支持体１３４は、上側安定軸受けＨＴＳ１２４を支持する。機械的支持体１３６は、下側安定軸受けＨＴＳ配列１２６を支持する。機械的支持体１３８は、ステータコイルアセンブリ１２８を支持する。機械的支持体１３４、１３６、１３８は、フライホイールアセンブリ１００を囲む真空チャンバ（図示せず）に屈曲可能に取り付けられる。支持体１３４、１３８は互いに直に隣接して示されているが、そのような支持体は、所望の距離だけ互いに離隔されてもよいことを理解されたい。フライホイールロータ１１０は、上側安定軸受け（ロータＰＭ１１４とステータＨＴＳ１２４とを備える）と、下側安定軸受け（ロータＰＭ１１６とステータＨＴＳアレイ１２６とを備える）とを含む磁気軸受け構成部品を介して磁気的に浮揚される。中心線１０２周りでのロータ１１０の回転加速は、ロータＰＭ１１８とステータコイル１２８との電磁相互作用によって達成される。機械的支持体１３６は、ＨＴＳアレイ１２６をグランドから断熱する。また、典型的には、ＨＴＳ配列１２６と、ＨＴＳ配列１２６を低熱源、たとえば図２に示されているような冷凍機などに接続する断熱構造物１３６との間に位置する熱伝導構造物（図示せず）がある。同様に、機械的支持体１３４は、ＨＴＳ１２４をグランドから断熱し、典型的には、ＨＴＳ１２４と、ＨＴＳ１２４を低熱源に接続する支持体１３４との間に配置された熱伝導構造物（図示せず）がある。
【００４０】
図７は、オープンコアフライホイール１５０が中心線１５２周りで同心である本開示の他の変形形態を示す。このフライホイールは、ロータ１６０と、ステータ１７０とを備える。ロータ１６０は、繊維複合体リム１６２と、リフト軸受けＰＭ１６４と、安定ＰＭ１６６と、モータ／発電機ＰＭ配列１６８とを備える。ステータ１７０は、リフト軸受けＰＭ１７４と、ＨＴＳアセンブリ１７６と、ステータコイルアセンブリ１７８と、機械的支持体１８４、１８６、１８８とを備える。機械的支持体１８４は、リフト軸受けＰＭ１７４を支持する。機械的支持体１８６は、ＨＴＳ配列１７６を支持する。機械的支持体１８８は、ステータコイルアセンブリ１７８を支持する。機械的支持体１８４、１８６、１８８は、好ましくはフライホイールアセンブリ１５０を囲む真空チャンバ（図示せず）に屈曲可能に取り付けられる。フライホイールロータ１６０は、リフト軸受け（ロータＰＭ１６４とステータＰＭ１７４とを備える）と、安定軸受け（ロータＰＭ１６６とステータＨＴＳ１７６とを備える）とを含む磁気軸受け構成部品を介して磁気的に浮揚される。中心線１５２周りでのロータ１６０の回転加速は、ロータＰＭ１６８とステータコイル１７８との電磁相互作用によって達成される。機械的支持体１８６は、ＨＴＳアレイ１７６をグランドから断熱する。また、典型的には、ＨＴＳ軸受けアセンブリ１７６と、ＨＴＳ１７６を低熱源、たとえば図２に示されているような冷凍機などに接続する断熱構造物１８６との間に配置された熱伝導構造物（図示せず）がある。
【００４１】
新規なオープンコアフライホイールアセンブリ内のリフト軸受けに関して、いくつかの構成が本開示によって企図されている。図８ａは、フライホイールアセンブリの上側部分を示す１つの変形形態を対象とする。ＰＭ２０４は、複合体リム２０２の上側部に取り付けられる。ステータＰＭ２０６は、ＰＭ２０４の垂直上方に位置する。図８ａ内の黒色矢印は、磁化の好ましい方向を示す。この例では、ロータ２０２を重力に対して持ち上げる助けとなる、ＰＭ２０４に対する上向きの吸引力がある。この変形形態では、ステータＰＭ２０６は、ロータ複合体リム２０２が半径方向外向きに膨張したとき吸引力がほぼ均一で

あるように十分幅の広いものである。

【００４２】

リフト軸受けの別の変形形態が図８ｂに示されており、ロータＰＭ２０４の下方に、そこから半径方向内側に位置する第２のステータＰＭ２０７を示す。この場合の磁力は反発するものであり、ロータＰＭ２０４の下方のステータＰＭ２０７の位置は、ロータ２０２に対する追加の上向きの力をもたらすことが好ましい。追加の磁石を追加し、図８ｃに示されているように力を増やしてもよいことを理解されたい。この場合、ステータＰＭ２０７とロータＰＭ２１０との相互作用間に、ロータ２０２に対する追加の上向きの力をもたらす追加の吸引力がある。また、ロータＰＭ２１０とステータＰＭ２１２との相互作用間に、ロータに対する上向きの力をもたらす追加の反発力がある。

【００４３】

図８ｄに示されているように、本開示の追加の代替形態は、垂直でない磁化、たとえば半径方向の磁化などを企図している。図８ｅは、機械的支持体２０９に取り付けられた追加のＰＭ２０７を示す。

【００４４】

本開示の他の変形形態は、安定軸受けを様々な配置に配向することを企図している。図９ａは、図６に存在するはずであるような、ＰＭ１１６の磁化を示す。図９ｂでは、ある代替形態が、安定軸受けＰＭ３０４から半径方向内側に位置するＨＴＳ３０６を示す。この配向では、ＰＭ３０４は、半径方向で磁化される。図９ｂは半径方向内向きとして磁化方向を示すが、そのような磁化は、半径方向外向きに向けることができることを理解されたい。

【００４５】

本開示で企図されている高速のロータ、および多数の極が、高い電力密度を生み出す。さらに、ステータ巻線の半径方向の厚さは、本開示のフライホイールの比較的低い電力要件に合わせて小さいものである。ステータ巻線は真空チャンバの上部から支持されるので、本開示によって企図されているものは、複数のロータの有利な存在を含む。たとえば、図１０に示されているように、チャンバ壁３３２を有する真空チャンバ内のフライホイールアセンブリ３３０が、外側ロータ半径を有する第１の、または外側のロータ３３４を備え、外側ブラシレスＰＭ　Ｍ／Ｇステータ３３６が外側ロータ３３４に関連付けられている。外側ＰＭリフト軸受け３３８が外側ロータ３３４の上方に位置し、外側ＨＴＳ軸受け３４０が外側ロータ３３４の下方に位置する。内側ロータ３４２は、外側ロータ半径より小さい内側ロータ半径を有し、したがって、外側ロータ３３４から半径方向内側の位置に配置される。内側ＰＭリフト軸受け３４４および内側ＨＴＳ軸受け３４６が、それぞれ内側ロータ３４２の上方および下方に配置されて示されている。内側ブラシレスＰＭ　Ｍ／Ｇステータ３４８が、内側ロータ３４２から半径方向内側に位置して示されている。冷凍機３５０がフライホイールアセンブリ３３０の中心付近に位置して示されており、真空ポンプ３５２の上方に配置されている。真空ポンプ３５２は、小型のターボ分子ポンプまたはゲッターサブリメーションポンプであることが好ましい。小型冷凍機のコールドヘッド（図示せず）がＨＴＳ軸受け３４０、３４６に対して熱伝導し、それらを約３０Ｋから約８０Ｋの好ましい動作温度に保つ。

【００４６】

本開示の一変形形態では、真空チャンバは、フライホイールアセンブリの重量のかなりの部分を構成する。複数の入れ子型ロータを（本開示の好ましいフライホイールアセンブリ内に）組み込むことにより、全体的なシステムエネルギーおよび体積密度が改善される。一変形形態である、図１０に示されているものなど２重ロータ構成では、これらのロータは、独立のフライホイールとして独立して動作される。内側ロータは、好ましくは、外側ロータと著しく似た最大リム速度を有するが、意図的により高い最大ｒｐｍ（周速）を有することになる。

【００４７】

さらに、図６は、リフト軸受けが第２の安定軸受けで置き換えられている他の代替形態を

示す。図６に示され、図３～５に関連して論じられているモータ／発電機ＰＭ１１８は、半径方向、周方向、またはこれら２つの組合せである磁化を示す。

【００４８】

図１１は、モータ／発電機ＰＭが、周方向周りで方向を交互に変える垂直磁化を有する構成を対象とする、他の企図されている変形形態を示す。図１１では、オープンコアフライホイールアセンブリのロータ４６０は、繊維複合体リム４６２、上側ＰＭ４６４、下側ＰＭ４６６、ＰＭリング４６８を備えることが好ましい。ロータ４６０は実質的に円筒形であること、およびＰＭ４６４、４６６、４６８は、好ましくはロータリム４６２の内面の円周全体周りに延在すると理解されることを理解されたい。中央に配置されたＰＭ４６８は、矢印に従って磁化されて示されており、磁化の方向は、垂直の上向きまたは下向きの方向で交互に変わる。

【００４９】

図１２は、本開示のロータの代替形態を示す。オープンコアフライホイールアセンブリのロータ５１０は、繊維複合体リム５１２、上側ＰＭ５１４、下側ＰＭ５１６、梯子形銅導体５１８を備えることが好ましい。ロータリム５１２は実質的に円筒形であること、およびＰＭ５１４、５１６、５１８は、好ましくはロータリム５１２の内面の円周全体周りに延在すると理解されることを理解されたい。

【００５０】

さらに、本開示によれば、また図１３に示されているように、３つ以上のロータを同じ真空チャンバ内に組み込み、複数のフライホイールが同じ真空チャンバを共用する状態で、フライホイールアセンブリのエネルギー密度を高めてもよい。同じ真空チャンバ内に収容されることにより、これらの内側ロータは、真空ポンプおよび冷凍機などを本質的に共用し、フライホイールシステムに必要とされるフットプリントをさらに削減する。複数のロータを１つのフライホイールアセンブリ内で入れ子にすることは、オープンコアアーキテクチャで最もよく達成することができる。

【００５１】

図１３は、１つのロータアセンブリ内に３つのロータを封じ込めるシステムの概略図である。システム６００は、共通の中心線６０２に対して内側から外向きに符号を付けた３つのオープンコアの実質的に円筒形のフライホイールアセンブリ「ａ」「ｂ」「ｃ」を備える。各ロータは、繊維複合体リング６１２と、上側ＰＭ６１４および下側ＰＭ６１６と、モータ／発電機ＰＭ６１８とを備える。下側ＰＭ６１６は、ＨＴＳ６２６と相互作用し、安定軸受けを形成する。ＨＴＳ６２６は、機械的支持体６３６によって機械的に支持される。上側ＰＭ６１４は、ステータＰＭ６２４と相互作用し、リフト軸受けを形成する。モータ／発電機ＰＭ６１８は、ステータコイル６２８と相互作用し、「モータ」モードではロータを加速し、「発電」モードではロータを減速する。各ステータコイル６２８ａ、ｂ、ｃは、支持体６３８によって機械的に支持される。３つの機械的支持体６３８ａ、ｂ、ｃは、単一の機械的支持体６３４に接続されて示されている。

【００５２】

２つのロータ変形形態では、２つのロータを反対方向に動作させることにより、システム全体の正味の角運動量が低減され、高速で動作するフライホイールの通過がさらに容易になる。２つの逆回転ロータが実質的に同じ速度、半径方向の厚さおよび高さを有する場合、外側リムが内側ロータより大きい運動エネルギーおよび角運動量を有することになる。この場合、角運動量を完全に消去することができない。しかし、本開示の他の変形形態によれば、角運動量は、内側ロータの高さおよび／または半径方向の厚さを意図的に変えることによって実質的に打ち消され、実質的に消去される。半径方向の厚さは、しばしば半径方向応力に対処する能力によって左右され、一方、高さは、制約のより少ないパラメータである。

【００５３】

さらに、所望のフライホイールシステムに対する設計制約が、内側ロータも外側ロータも同じ高さを維持することを余儀なくするものであった場合、本開示は、第３のロータを組

み込むことを企図している。この設計では、角運動量を、たとえば同じ方向に２つのロータ（好ましくは２つの内側ロータ）を回転させ、残りのロータを反対方向に回転させることによって実質的に完全に打ち消すことができる。前述のシナリオおよび複数の入れ子型ロータを有する設計のそれぞれにおいて、ロータの運動エネルギーが足し合わされ、フライホイールシステムの総システム運動エネルギーを得る。本開示は、オープンコアアーキテクチャにより、真空ポンプおよび冷凍機を最内郭ロータの内側の実質的に円筒形の空間内に置くことができ、それにより、３つの構成部品を真空境界の上部および下部に装着することに比べてシステムの体積（ｖｏｌｕｍｅｔｒｉｃ　ｆｏｏｔｐｒｉｎｔ）全体が削減される点で特に有利である。ロータ、軸受け構成部品、およびＭ／Ｇステータは、真空にされる鋼製容器によって封入される。チャンバの初期真空化は、たとえば粗引きポンプなど任意の好適なポンプによって行われる。粗引きポンプを除去し、次いでチャンバをたとえば７０ｌｓ－１、ＤＣ２４Ｖターボ分子ポンプ、および好ましくは関連のバッキングポンプによって連続的に真空化することができる。

【００５４】

さらに、好ましいＭＷＣＮＴを含めて著しく改善された強度／密度比を有するロータ材料をオープンコアフライホイールアーキテクチャに組み込む本開示は、フライホイールロータエネルギー密度を約２６４Ｗｈ／ｋｇという現在知られている値から少なくとも約４７３Ｗｈ／ｋｇに高め、それに対応する約１１ＧＰａから約６３ＧＰａへの繊維引張り強度の増大（既知のデバイスから少なくとも約８０％のエネルギー密度および強度の増大）をもたらすことになる。実際、ＭＷＣＮＴの壁厚を約０．０７５ｎｍの物理的な壁厚に正規化すると、少なくとも約６３ＧＰａの理論壁厚が達成可能である。さらに、シングルウォールＣＮＴ（ＳＷＣＮＴ）もまた本開示によって企図されており、ＳＷＣＮＴは、適切な、さらには優れた質量効率的（ｍａｓｓ　ｅｆｆｉｃｉｅｎｔ）補強をもたらすことができるので、本明細書に記載の本発明のフライホイールアセンブリのロータ構成部品に組み込むことができることを理解されたい。典型的なＳＷＣＮＴは、約１．３５ｎｍの直径を有する。この直径を１原子の原子間間隔と共に使用して、わずか３９％の体積分率（Ｖｆ）が達成可能である。３ｎｍの直径は、６０％のＶｆを生み出すことになる。本開示の変形形態と共に使用するための最適なＣＮＴは、ＣＮＴ直径、達成可能なＶｆ、およびＣＮＴ補強の効率を釣り合わせるものであることを理解されたい。

【００５５】

本開示の好ましい変形形態によれば、大抵のフライホイールロータが、ＨＴＳ軸受けによって磁気的に浮揚されるフィラメント巻き繊維複合体を含む。ＨＴＳ軸受けは、ＰＭロータと、ＨＴＳステータとを備える。ＨＴＳステータの超伝導特性により、浮揚は受動的なものであり、有意なフィードバックまたは能動制御は必要としない。ＨＴＳステータは、イットリウム・バリウム・銅酸化物（ＹＢＣＯ）、またはＹがたとえばＧｄ、Ｎｄ、Ｅｕなど他の希土類元素で置き換えられた他の材料の個々のＨＴＳ結晶の配列を含み、ＨＴＳ結晶が、冷凍機のコールドヘッドに対する熱伝導によって約７０Ｋから約８０Ｋの温度に冷却されることが好ましい。軸受け動作に極低温の液体（たとえば液体窒素など）が必要とされないことが好ましい。ブラシレスＭ／Ｇは、ＰＭロータと、好ましくは強磁性ヨーク内に銅巻線を備えるステータとを備える。Ｍ／Ｇステータ冷却は、真空チャンバ壁に対する熱伝導によって行われる。この機能のために寄生エネルギーは必要とされない。エネルギー吸収用封じ込めレイヤが、回転するフライホイールと外側真空シェルとの間に配置されることが好ましい。真空チャンバと真空チャンバ内の静止構成部品両方の重量を最小限に保ち、フライホイール配列のエネルギー密度要件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部品は、リフト軸受け、タッチダウン軸受け、およびパワーエレクトロニクスを含む。

【００５６】

本開示のフライホイールシステムのための有用な応用例は豊富である。実際、持続可能なエネルギー貯蔵および効果的利用のためのどのような必要とされるニーズも、本開示から用途および利益を得るはずである。たとえば、本開示のフライホイールシステムの実質的

に無音の動作により、無音またはステルスモードでの有人または無人のビークル運転が可能になる。さらに、現在開示されているシステムは、急速充放電、ならびに、たとえばグリッド、再生可能エネルギー源、発電機など、あらゆる使用可能なエネルギー源から充電することを可能にする。さらに、本開示の変形形態を、移動運転および静止運転での断続しないエネルギー貯蔵および制限可能なエネルギー貯蔵または効果的利用を必要とする静的または移動型のデバイス、システム、またはビークルに組み込むために、独特な工具またはインフラストラクチャは必要とされない。企図されているビークルは、有人および無人の航空機、宇宙機、陸上および水上および水中ビークルを含む。開示されている変形形態のオープンコアアーキテクチャ設計に対するモジュール型手法は、全体的なシステム破壊の危険性を低減し、既知のフライホイールシステムに比べてより深い（たとえば、約９５％を超える）エネルギー放出をさらに可能にする。さらに、これらのシステムは、フライホイール回転スピードの監視だけに基づいて非常に正確な充電の判定を可能にする。

【００５７】

本開示の好ましい変形形態および代替形態について例示し述べたが、本開示の精神および範囲から逸脱することなしに、様々な変更および置き換えを行うことができることを理解されたい。したがって、本開示の範囲は、添付の特許請求の範囲、およびその均等物によってのみ限定されるべきである。

【符号の説明】

【００５８】

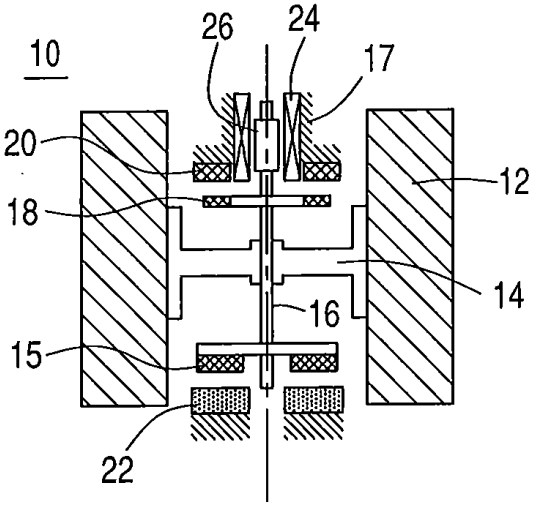
１０　シャフト－ハブフライホイールアセンブリ
１２　繊維複合体リムロータ
１４　ハブ
１５　永久磁石
１６　シャフト
１７　支持体
１８　永久磁石
２０　永久磁石
２２　高温超伝導体
２４　ステータコイル
２６　永久磁石
３０　フライホイールアーキテクチャ
３２　繊維複合体リムロータ
３３　内面
３４　永久磁石
３６　永久磁石
３８　永久磁石
４０　モータ／発電機
４２　ステータコイル
４３　支持構造物
４５　高温超伝導体
４６　支持体
４８　永久磁石
６０　システム
６２　ＨＴＳ要素
６４　冷凍機
６６　コールドヘッド
６８　ケーブル
７０　熱伝導プレート
７２　伝導ラグ
７４　非熱伝導プレート

７６　非熱伝導支持体
７８　グランド支持体
１００　オープンコアフライホイール
１０２　中心線
１１０　ロータ
１１２　繊維複合体リム
１１４　永久磁石
１１６　永久磁石
１１８　永久磁石
１２０　ステータ
１２４　ＨＴＳ
１２６　ＨＴＳ
１２８　ステータコイルアセンブリ
１３４　機械的支持体
１３６　機械的支持体
１３８　機械的支持体
１５０　オープンコアフライホイール
１５２　中心線
１６０　ロータ
１６２　繊維複合体リム
１６４　永久磁石
１６６　永久磁石
１６８　永久磁石
１７０　ステータ
１７４　永久磁石
１７６　ＨＴＳ
１７８　ステータコイルアセンブリ
１８４　機械的支持体
１８６　機械的支持体
１８８　機械的支持体
２０２　複合体リム
２０４　永久磁石
２０６　永久磁石
２０７　第２のステータＰＭ
２０９　機械的支持体
２１０　ロータＰＭ
２１２　ステータＰＭ
３３０　フライホイールアセンブリ
３３２　チャンバ壁
３３４　外側ロータ
３３６　Ｍ／Ｇステータ
３３８　ＰＭリフト軸受け
３４０　外側ＨＴＳ軸受け
３４２　内側ロータ
３４４　内側ＰＭリフト軸受け
３４６　内側ＨＴＳ軸受け
３４８　Ｍ／Ｇステータ
３５０　冷凍機
３５２　真空ポンプ
４６０　ロータ

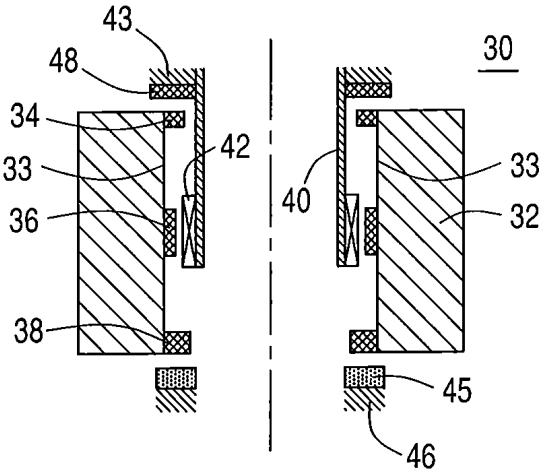
４６２　繊維複合体リム
４６４　上側ＰＭ
４６６　下側ＰＭ
４６８　ＰＭリング
５１０　ロータ
５１２　繊維複合体リム
５１４　上側ＰＭ
５１６　下側ＰＭ
５１８　梯子形銅導体
６００　システム
６０２　中心線
６１２　繊維複合体リング
６１４　上側ＰＭ
６１６　下側ＰＭ
６１８　モータ／発電機ＰＭ
６２４　ステータＰＭ
６２６　ＨＴＳ
６２８　ステータコイル
６３６　機械的支持体
６３８　機械的支持体

【図面】

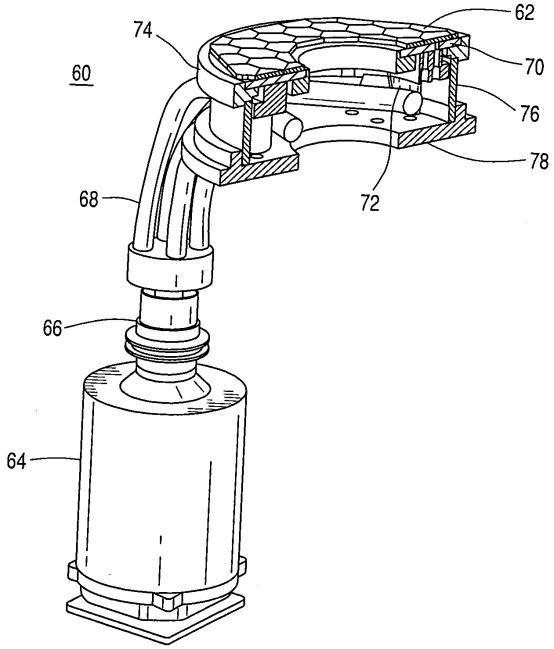
【図１ａ】



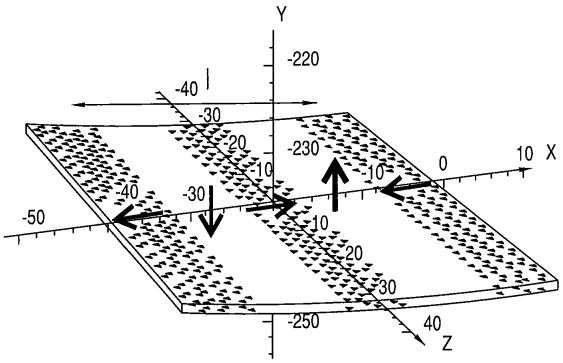
【図１ｂ】



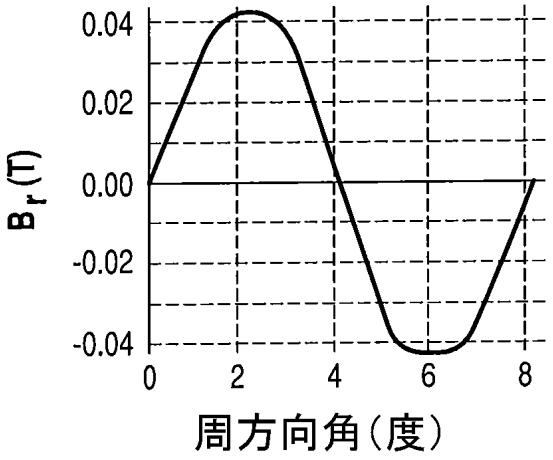
【図２】


74
62
60
70
76
78
68
72
66
64

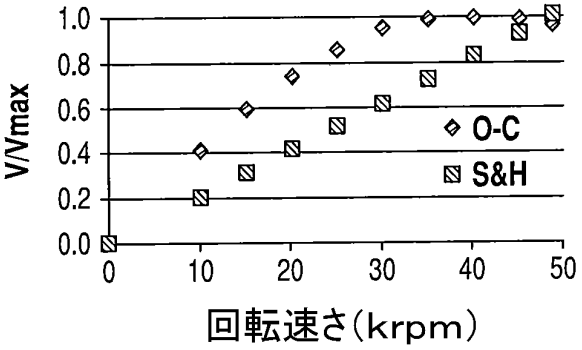
【図３】


Y
-220
-40
-30
-20
-230
-10
-10
0
10
X
-40
-30
-50
10
20
30
-250
40
Z

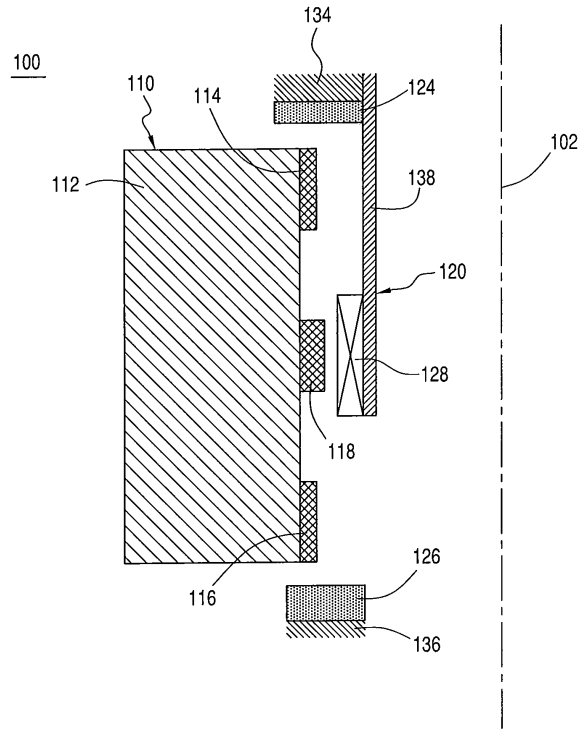
【図４】


0.04
0.02
0.00
-0.02
-0.04
B_r(T)
0
2
4
6
8
周方向角(度)

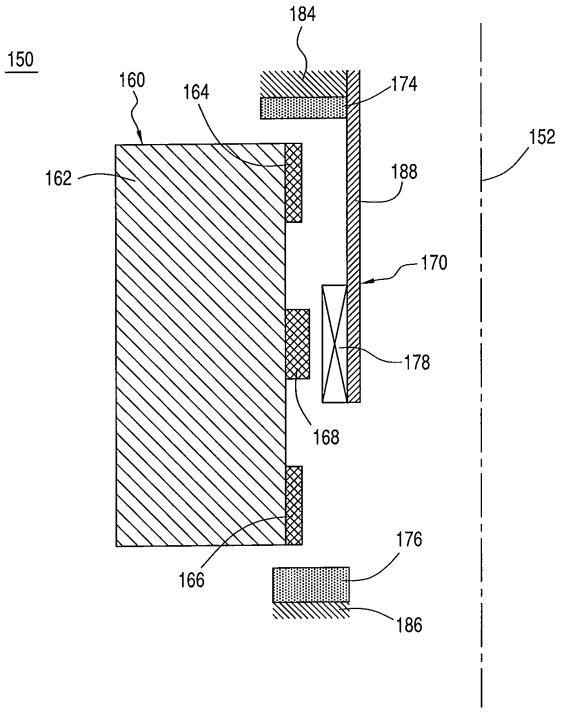
【図５】


1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
V/Vmax
O-C
S&H
0
10
20
30
40
50
回転速さ(krpm)

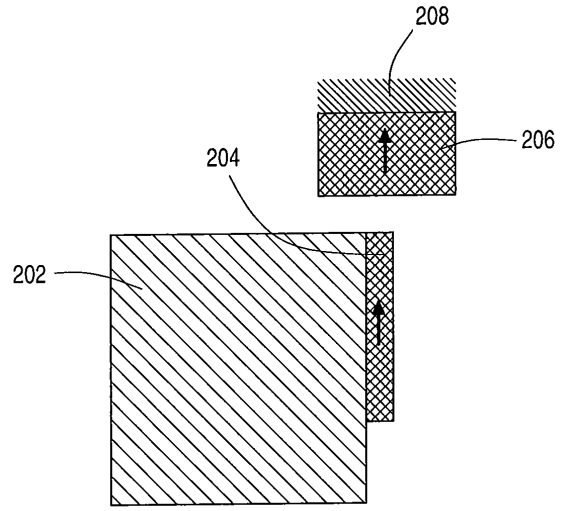
【図６】


100
110
114
134
124
102
112
138
120
128
118
126
116
136

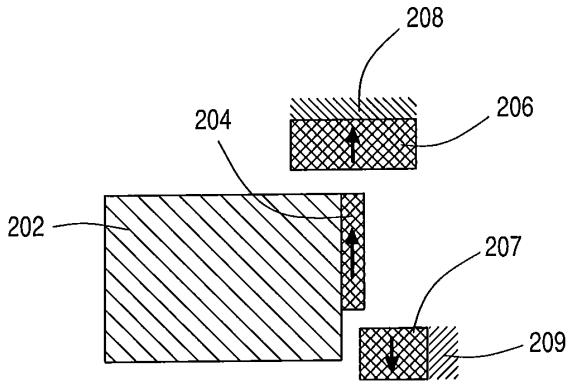
【図７】


150
184
160
164
174
152
162
188
170
178
168
176
166
186

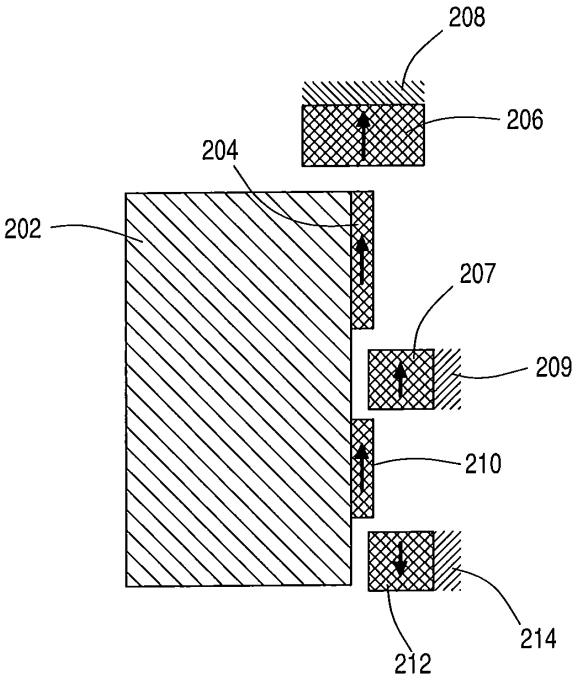
【図８ａ】


208
206
204
202

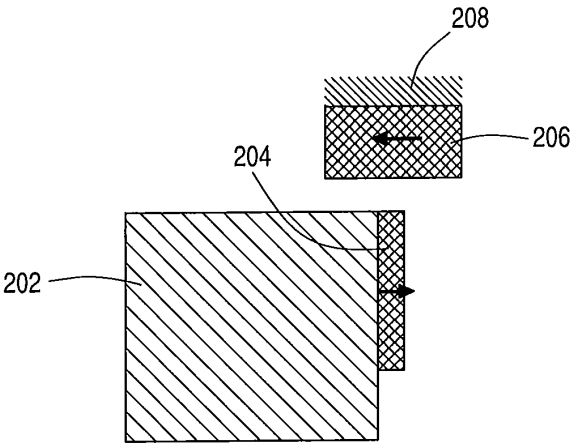
【図８ｂ】


208
206
204
202
207
209

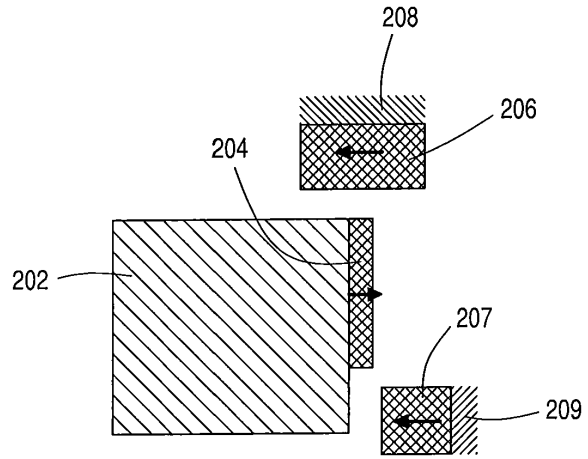
【図８ｃ】



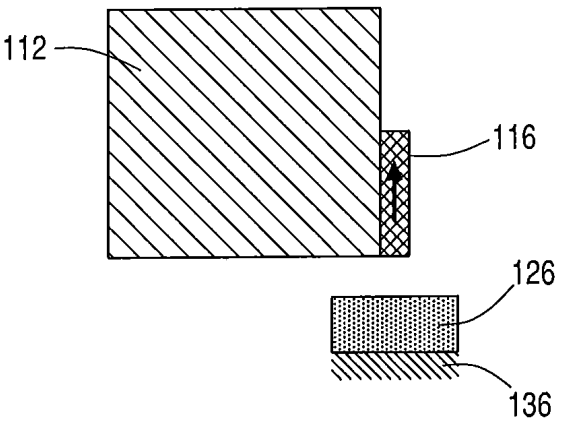
【図８ｄ】



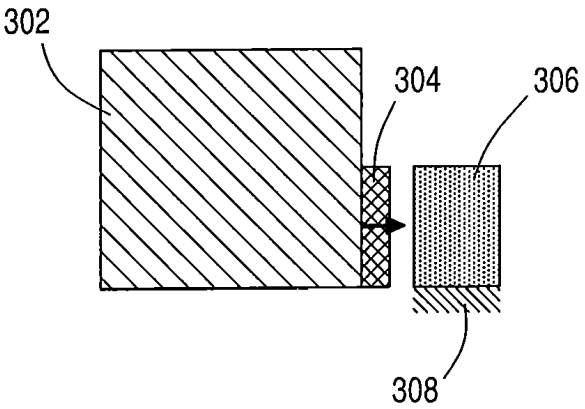
【図８ｅ】



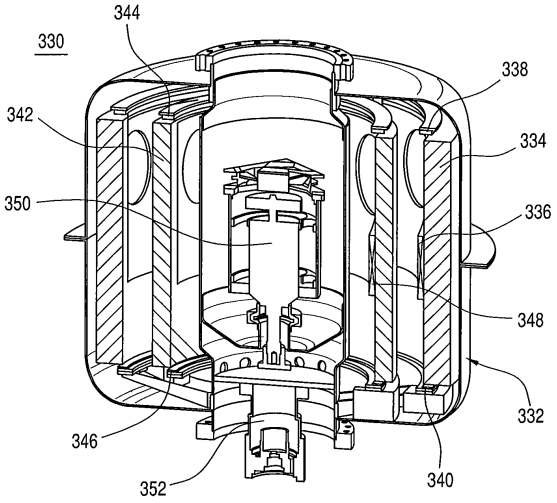
【図９ａ】



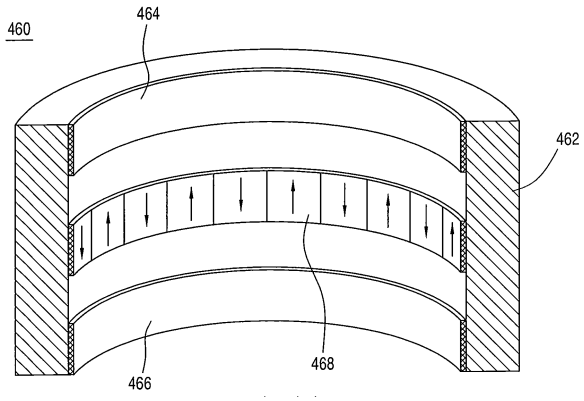
【図９ｂ】



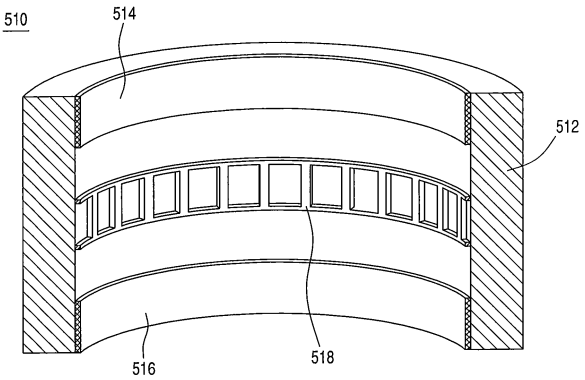
【図１０】



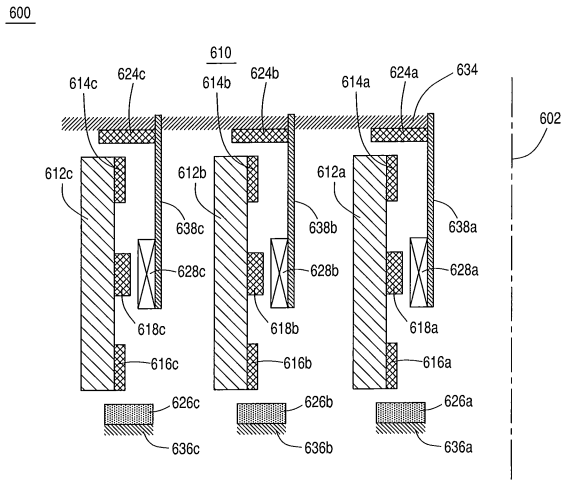
【図１１】



【図１２】



【図１３】


600
610
614c
624c
614b
624b
614a
624a
634
602
612c
612b
612a
638c
638b
638a
628c
628b
628a
618c
618b
618a
616c
616b
616a
626c
626b
626a
636c
636b
636a

フロントページの続き

アメリカ合衆国 ワシントン， シアトル， ピー．オー． ボックス ３７０７
(72)発明者 ウィレンスキー， マーク エス．
アメリカ合衆国 ワシントン， シアトル， ピー．オー． ボックス ３７０７
(72)発明者 コーザー， マイケル ピー．
アメリカ合衆国 ワシントン， シアトル， ピー．オー． ボックス ３７０７

審査官 小林 紀和
(56)参考文献 特開平１１－３５５９８０（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０４０８８０４１（ＵＳ，Ａ）
特開２００４－０９６９８９（ＪＰ，Ａ）
特許第６２１６５３２（ＪＰ，Ｂ２）
特許第６４６６５３７（ＪＰ，Ｂ２）
(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０２Ｋ ７／０２
Ｈ０２Ｋ ７／０９
Ｆ１６Ｃ ３２／０４
Ｆ１６Ｈ ３３／０２