

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-239796

(P2010-239796A)

(43) 公開日 平成22年10月21日(2010.10.21)

(51) Int.Cl.
H02J 15/00 (2006.01)F1
H02J 15/00

テーマコード (参考)

A

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2009-85831 (P2009-85831)
(22) 出願日 平成21年3月31日 (2009.3.31)(71) 出願人 000173784
財団法人鉄道総合技術研究所
東京都国分寺市光町2丁目8番地38
(74) 代理人 100089635
弁理士 清水 守
(74) 代理人 100096426
弁理士 川合 誠
(72) 発明者 清野 寛
東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財
団法人 鉄道総合技術研究所内
(72) 発明者 長嶋 賢
東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財
団法人 鉄道総合技術研究所内

最終頁に続く

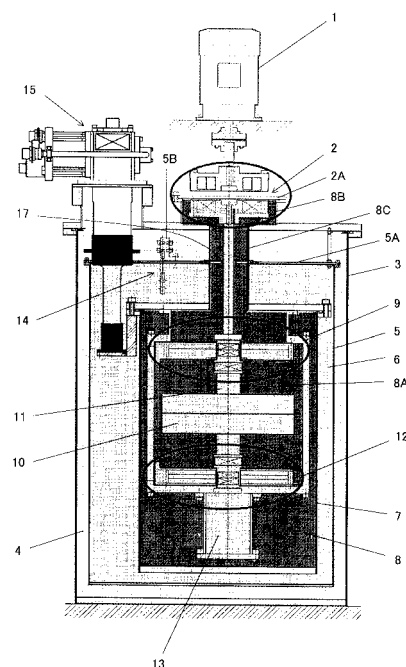
(54) 【発明の名称】 超電導フライホイール蓄電装置

(57) 【要約】

【課題】 ロータ及びステータに超電導体を使用した磁気支持装置を用いて、磁気支持を安定かつ恒久的に行い、高効率の電力貯蔵を行うことができる超電導フライホイール蓄電装置を提供する。

【解決手段】 超電導フライホイール蓄電装置において、フライホイール10と、このフライホイール10に固定される回転軸11と、この回転軸11に連結される非接触トルク伝達部品2とで構成される回転体と、内槽8と、この内槽8周りの輻射シールド槽6と、この輻射シールド槽6周りの真空容器3とが配置され前記回転軸11を非接触で支持する超電導体を有する磁気支持装置9、12とを具備する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

(a) フライホイールと、該フライホイールに固定される回転軸と、該回転軸に連結される非接触磁気力トルク伝達部品とで構成される回転体と、

(b) 内槽と、該内槽周りの輻射シールド槽と、該輻射シールド槽周りの真空槽と、該真空槽周りの真空容器とが配置され前記回転軸を非接触で支持する超電導体を有する磁気支持装置とを具備することを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

【請求項 2】

請求項 1 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記磁気支持装置は、浮上体である回転体と固定側であるステータから構成され、その双方が超電導体からなることを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

10

【請求項 3】

請求項 2 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記浮上体であるロータ及び前記固定側であるステータが、浮上安定化用超電導体及び径方向支持用超電導体からなることを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

【請求項 4】

請求項 2 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記浮上体であるロータが、浮上安定化用超電導体及び径方向支持用超電導体から構成され、固定側に磁界発生用の超電導コイルを配置することを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

【請求項 5】

請求項 1 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記内槽は、中央部と、該中央部に接続される温度勾配導管部と、該温度勾配導管部に接続される室温部とから構成され、前記中央部には前記フライホイールと前記回転軸と前記磁気支持装置及び異常時のストッパ装置としてのバックアップスラスト軸受部が収納されることを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

20

【請求項 6】

請求項 5 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記室温部には前記非接触磁気力トルク伝達部品が収納されることを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

【請求項 7】

請求項 6 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記室温部の内槽は前記真空槽から外部に突出した形になっていることを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

30

【請求項 8】

請求項 1 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記真空容器の外部の電動／発電機側にある前記非接触磁気力トルク伝達部品の内槽蓋部を非金属部材とすることを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

【請求項 9】

請求項 5 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記温度勾配導管部は、前記磁気支持装置の冷却温度である極低温から、前記室温部における室温までの温度勾配を付与する部分であり、熱侵入を抑えるために薄肉円管で構成し、温度勾配が確保できる長さを有することを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

40

【請求項 10】

請求項 9 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記温度勾配導管部にバフ板を設けて、室温部分と極低温部分との対流を防止することを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

【請求項 11】

請求項 5 記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記内槽に希薄ガスを導入して前記径方向支持用超電導体を冷却し、十分に冷却された前記径方向支持用超電導体からの分子伝導冷却と輻射冷却によって、前記浮上安定化用超電導体を冷却することを特徴とする超電導フライホイール蓄電装置。

【発明の詳細な説明】

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、超電導体を使用した磁気支持装置によって回転体を支持し、電力を回転体の運動エネルギーとして蓄積する超電導フライホイール蓄電装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来、余剰電力をフライホイールの運動エネルギーに変換して貯蔵するとともに、フライホイールに貯蔵されている運動エネルギーを必要時に電気エネルギーに変換して取り出すための、超電導フライホイールシステムの開発が行われている（下記特許文献1及び2、下記非特許文献1及び2参照）。

10

【0003】

また、高温超電導バルク体を利用した磁気浮上用途の回転体用真空断熱容器（下記特許文献3参照）が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2003-219581号公報

【特許文献2】特開2008-228535号公報

【特許文献3】特開2008-235355号公報

【非特許文献】

20

【0005】

【非特許文献1】市原，松永，喜多，平林，磯野，広瀬，吉井，栗原，齊藤，齊藤，村上，高林，棗田，腰塚，「10kWh級フライホイール電力貯蔵システム用ラジアル型超電導軸受の開発」，低温工学，Vol. 39，No. 12，pp. 638-644，2004.

【非特許文献2】東海旅客鉄道株式会社，「超電導フライホイールシステムの開発」，新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書，2008

【非特許文献3】岩手県地域結集型共同研究事業，バルク超電導体の熱物性データベース（<http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/database.html>）

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、上記した超電導体を磁気支持に利用した従来のフライホイール装置では、特に回転体側に超電導体を配置するのが困難であった。

【0007】

また、回転体側にも超電導体を適用した磁気支持フライホイール（上記特許文献1参照）では、トルク伝達部品の配置条件や冷却方法などの必要諸条件が解明されておらず、未完成の状態であった。

【0008】

40

さらに、回転体の軸を断熱保冷容器として、その中に超電導体を配置する装置（上記特許文献3参照）では、寒剤の注液作業及び追加注液作業が必要であるため、連続運転のためには寒剤の状態監視及び自動注液装置などの付帯設備が必要となり、大掛かりなものとなるといった問題があった。

【0009】

本発明は、上記状況に鑑みて、ロータ及びステータに超電導体を使用した磁気支持装置を用いて、磁気支持を安定かつ恒久的に行い、高効率の電力貯蔵を行うことができる超電導フライホイール蓄電装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

50

本発明は、上記目的を達成するために、

〔１〕超電導フライホイール蓄電装置において、フライホイールと、このフライホイールに固定される回転軸と、この回転軸に連結される非接触磁気力トルク伝達部品とで構成される回転体と、内槽と、この内槽周りの輻射シールド槽と、この輻射シールド槽周りの真空槽と、この真空槽周りの真空容器とが配置され前記回転軸を非接触で支持する超電導体を有する磁気支持装置とを具備することを特徴とする。

【００１１】

〔２〕上記〔１〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記磁気支持装置は、浮上体である回転体と固定側であるステータから構成され、その双方が超電導体からなることを特徴とする。

10

【００１２】

〔３〕上記〔２〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記浮上体であるロータ及び前記固定側であるステータが、浮上安定化用超電導体及び径方向支持用超電導体からなることを特徴とする。

【００１３】

〔４〕上記〔２〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記浮上体であるロータが、浮上安定化用超電導体及び径方向支持用超電導体から構成され、固定側に磁界発生用の超電導コイルを配置することを特徴とする。

【００１４】

〔５〕上記〔１〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記内槽は、中央部と、この中央部に接続される温度勾配導管部と、この温度勾配導管部に接続される室温部とから構成され、前記中央部には前記フライホイールと前記回転軸と前記磁気支持装置及び異常時のストッパ装置としてのバックアップスラスト軸受部が収納されることを特徴とする。

20

【００１５】

〔６〕上記〔５〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記室温部には前記非接触磁気力トルク伝達部品が収納されることを特徴とする。

【００１６】

〔７〕上記〔６〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記室温部の内槽は前記真空槽から外部に突出した形になっていることを特徴とする。

30

【００１７】

〔８〕上記〔１〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記真空容器の外部の電動／発電機側にある前記非接触磁気力トルク伝達部品の内槽蓋部を非金属部材とすることを特徴とする。

【００１８】

〔９〕上記〔５〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記温度勾配導管部は、前記磁気支持装置の冷却温度である極低温から、前記室温部における室温までの温度勾配を付与する部分であり、熱侵入を抑えるために薄肉円管で構成し、温度勾配が確保できる長さを有することを特徴とする。

【００１９】

40

〔１０〕上記〔９〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記温度勾配導管部にバッフル板を設けて、室温部分と極低温部分との対流を防止することを特徴とする。

【００２０】

〔１１〕上記〔５〕記載の超電導フライホイール蓄電装置において、前記内槽に希薄ガスを導入して前記径方向支持用超電導体を冷却し、十分に冷却された前記径方向支持用超電導体からの分子伝導冷却と輻射冷却によって、前記浮上安定化用超電導体を冷却することを特徴とする。

【発明の効果】

【００２１】

本発明によれば、次のような効果を奏することができる。

50

【0022】

(1) ロータ及びステータに超電導体を使用した磁気支持装置を用いて、磁気支持を安定かつ恒久的に行うことができる。

【0023】

また、この磁気支持装置でフライホイールを支持することで、回転抵抗を極小化した高効率電力貯蔵が可能となる。

【0024】

(2) 回転エネルギーから電気エネルギーへの変換部分が低温容器内に存在せず、冷却に要するエネルギーを削減できる。

【0025】

(3) 極低温から室温までの温度勾配を有する内槽を使うことで、内槽内部に配置する非接触磁気力トルク伝達部品に室温で使用する部品を適用できる。

【0026】

(4) 液体窒素などの冷媒を使用しないので、メンテナンスも容易である。

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の全体構成図である。

【図2】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の超電導磁気軸受特性確認用クライオスタットの構成図である。

【図3】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の超電導体を使用した磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）の構成図である。

【図4】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）の模式図である。

【図5】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の磁気支持装置の磁気支持例を示す図である。

【図6】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の磁気支持装置のバルク体の温度変化の試算を説明するための模式図である。

【図7】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の磁気支持装置のバルク体と冷却板の温度差変化予測図である。

【図8】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の第1の非接触磁気力トルク伝達部品を示す図である。

【図9】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の磁気力伝達機構の特性図である。

【図10】本発明の具体的な超電導フライホイール蓄電装置の特性図である。

【図11】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の第2の非接触磁気力トルク伝達部品を示す図である。

【図12】本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の高温超電導パワーリードの構成図である。

【発明を実施するための形態】

【0028】

本発明の超電導フライホイール蓄電装置は、フライホイールと、このフライホイールに固定される回転軸と、この回転軸に連結される非接触磁気力トルク伝達部品とで構成される回転体と、内槽と、この内槽周りの輻射シールド槽と、この輻射シールド槽周りの真空槽と、この真空槽周りの真空容器とが配置され前記回転軸を非接触で支持する超電導体を有する磁気支持装置とを具備する。

【実施例】

【0029】

以下、本発明の実施の形態について詳細に説明する。

【0030】

図1は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の全体構成図である。

10

20

30

40

50

【0031】

この図において、1は電動／発電機、2は非接触磁気力トルク伝達部品、3は真空容器、4は真空槽（断熱槽）、5はシールド容器、5Aは輻射シールド槽の蓋部、5Bは輻射シールド槽（中間温度槽）6の温度でパワーリードを冷却する温度定点用アンカ、7は内槽容器、8は内槽（極低温槽）、8Aは内槽中央部、8Bは内槽室温部、8Cは温度勾配導管部、9は上部磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）、10はフライホイール、11は回転軸、12は下部磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）、13はバックアップスラスト軸受部、14は高温超電導パワーリード、15は極低温用冷凍機である。

【0032】

フライホイール10と回転軸11及び非接触磁気力トルク伝達部品2で構成される回転体と、回転軸11を非接触で支持する超電導体を使用した磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）9、12を真空容器3内に配置する。内槽8、輻射シールド槽6、及び真空槽4を組み合わせる断熱容器を構成する。

【0033】

内槽8は、内槽中央部8A、内槽室温部8B、及び温度勾配導管部8Cから構成され、内槽中央部8Aには回転体としてのフライホイール10及び回転軸11と磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）9、12、異常時のストッパ装置としてのバックアップスラスト軸受部13が収納される。内槽中央部8Aは温度勾配導管部8Cを介して内槽室温部8Bにつながっており、この内槽室温部8Bには非接触磁気力トルク伝達部品2が収納される。なお、内槽室温部8Bは真空容器3から突出した形になっている。真空容器3の外部の電動／発電機1側にある非接触磁気力トルク伝達部品2の内槽蓋部2Aは、GFRPなどの非金属材料とする。

【0034】

また、温度勾配導管部8Cは、超電導体を使用した磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）9、12の冷却温度である内槽中央部8Aの極低温から、内槽室温部8Bにおける室温までの温度勾配を付与する部分であり、熱侵入を抑えるために薄肉円管で構成し、温度勾配が確保できる長さを有する。このような温度勾配を形成することで、内槽室温部8Bに配置する非接触磁気力トルク伝達部品に、室温で使用する部品を用いることができる。また、この温度勾配導管部8Cにバッフル板17を設けて、室温部分と極低温部分との対流を防止する。このバッフル板17は、発泡剤を用いた断熱材であり、これを温度勾配導管部8Cに回転軸11部分をくり抜いた形で配置する。このバッフル板17を設けることにより、槽内の気相部分の対流による熱伝導を主に防止する。

【0035】

図2は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の超電導磁気軸受の特性確認用クライオスタットの構成図である。

【0036】

この図に示すように、非接触磁気力トルク伝達部品2周りの内槽室温部8Bには内槽真空換気／ガス置換装置16が接続され、内槽8の真空換気／ガス置換が行われる。また、輻射シールド槽6は極低温用冷凍機15によって冷却される。この輻射シールド槽6は、その外周りを真空容器3の真空槽（断熱槽）4によって密封されている。内槽8内の部品への電力は高温超電導パワーリード14を介して供給される。

【0037】

図3は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の超電導体を使用した磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）の構成図であり、図3（a）は上面図、図3（b）は図3（a）のA-A断面図、図3（c）は側面図であり、図4はその磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）の模式図、図5はその磁気支持例を示す図であり、図5（a）は支持体の上下方向の変位（mm）に対する浮上力（N）の特性図、図5（b）は支持体の径方向の変位（mm）に対する径方向支持力（N）の特性図である。

【0038】

これらの図において、21は超電導コイル、22は超電導コイル21の中央部の円筒状

10

20

30

40

50

空間部、23は上部冷却板、24は下部冷却板、25、26は電極、27はクライオスタット側取付け面である。

【0039】

また、図4において、31は浮上安定化用超電導体（ロータ）、32は径方向支持用超電導バルク体（ステータ）、33はクライオスタット側取付け座面である。

【0040】

ここで、磁気支持装置の具体的構成例について説明する。

【0041】

(1) 磁気支持装置仕様については、回転軸を含む支持体（回転体）の総質量は100kg（フライホイール10の質量は50kg）である。

10

【0042】

(2) 冷却仕様については、内槽到達温度は20K以下、超電導バルク体温度は50K以下である。

【0043】

図5に示すように、上下方向変位（mm）に対して、符号が逆となる力が発生している。これは変位に対する復元力を意味する。100kgの支持体を軸受2組で支持した場合の均衡位置は-2mmとなるが、この位置では、上下方向でおよそ250N/mm、径方向でおよそ137N/mmの復元力が作用する。

【0044】

(3) バルク体冷却特性については、次のように計算できる。

20

【0045】

磁気支持装置のロータである高温超電導バルク体冷却特性に関する条件を表1に示す。

【0046】

【表1】

項目		記号	数値	根拠, 前提
回転子バルク体	直径(1)	R_1	0.023[m]	径方向支持用
	高さ(1)	B_1	0.03[m]	
	直径(2)	R_2	0.03[m]	軸方向(浮上力)支持用
	高さ(2)	B_2	0.04[m]	
	輻射率	ε_2	0.8	銅の酸化膜表面と同等の黒色
	受熱面積	A_2	0.0043[m ²]	受熱面は径方向支持用バルク体表面のみとした : $2 \pi R_1 B_1$
	密度(比重)	ρ	8×10^3 [kg/m ³]	Y(イットリウム)系材料
	質量	m	1.3[kg]	$\pi (R_1^2 B_1 + R_2^2 B_2) \rho$
	比熱	C	400[J/kgK]	Y系(Y25ab)の値(非特許文献3参照)
	発熱量	Q_1	1.3[W]	バルク体の単位質量あたりの発熱量は2.5[mW/N]程度で、1000[N]の上下力を2個のバルク体で受け持つため
雰囲気	伝熱ギャップ	d	4.8×10^{-3} [m]	バルク体 - 超電導磁石間の距離
	冷却板面積	A_1	0.0052[m ²]	超電導磁石のバルク体対向面面積
	冷却板輻射率	ε_1	0.8	銅の酸化膜表面と同等の黒色
	ヘリウム熱伝導度	κ	変数	輻射と気体分子伝導を含んだ見かけの熱伝導度。解析結果より算出

30

40

磁気支持装置部分における超電導磁石に接続された冷却板と、ロータであるバルク体との間の伝熱特性の算出方法を以下に示す。まず、輻射による伝熱量 Q_r は次式(1)の通りとなる。

【0047】

50

$$Q_e = \sigma \cdot A_2 \cdot (T_2^4 - T_1^4) / (1/\epsilon_1) + (A_1/A_2) \cdot [(1/\epsilon_2) - 1] \quad \dots (1)$$

式中、 σ はシュテファン・ボルツマン定数、 T_1 は冷却板温度、 T_2 はバルク体温度である。

【0048】

また、気体分子伝導による伝熱量 Q_c は次式 (2) の通りとなる。

【0049】

$$Q_c = \kappa_c \cdot A_2 \cdot (T_2 - T_1) / d \quad \dots (2)$$

式中、 κ_c は気体分子伝熱度である。

【0050】

本装置の使用条件では、冷却板とバルク体の間の伝熱は、輻射と気体分子伝導による伝熱のみの合計となるので、伝熱量は Q_e と Q_c の合計 Q となり、冷却板とバルク体の間の見かけの熱伝導率 κ は次式 (3) の通りとなる。

【0051】

$$\kappa = Q / [(T_2 - T_1) \cdot A_2] \quad \dots (3)$$

なお、見かけの熱伝導率 κ は圧力に応じて変化する表 1 に示した条件で算出した熱伝導率 κ は、表 2 の通りとなる。

【0052】

【表 2】

圧力[Pa]	1	10	30	100
熱伝導率[W/mK]	3.63×10^{-4}	3.19×10^{-2}	7.65×10^{-2}	2.53×10^{-1}

前記の伝熱特性に基づき、浮上力発生に伴うバルク体からの発熱量と、冷却板に奪われる伝熱量から、バルク体の温度変化を以下のように算出した。

【0053】

(4) 試算について、

軸受部の寸法を基に、冷却板から冷却することによりバルク体から奪われる伝熱量と、バルク体からの発熱量とを算出し、バルク体の温度変化を以下のように試算した。

【0054】

図 6 は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の磁気支持装置のバルク体の温度変化の試算を説明するための模式図である。

【0055】

この図において、41 はバルク体、42 は冷却板である。

【0056】

バルク体 41 は負荷によって熱量 Q_1 を発熱し、冷却板 42 からの非接触冷却により熱量 Q_2 を失う。このため、ある瞬間におけるバルク体 41 - 冷却板 42 間の温度差の微小時間変化は次式 (4) のようになる。

【0057】

$$d T / d t = (Q_1 - Q_2) / C m \quad \dots (4)$$

ここで、 $Q_2 = (\kappa A / d) \cdot T$ であるので、上記式 (4) は次式 (5) のようになる。

【0058】

$$d T / d t = (Q_1 / C m) - [(\kappa A / c m d) \cdot T] \quad \dots (5)$$

この式 (5) を解くと次式 (6) のようになる。

【0059】

$$T = C e^{\frac{\kappa A}{C m d} t} + \frac{Q_1 d}{\kappa A} \quad \dots (6)$$

10

20

30

40

50

初期条件 $t = 0$ のとき、温度差 $T = 0$ とすると、上記式 (6) は次式 (7) のようになる。

【0060】

$$T = -\frac{Q_1 d}{\kappa A} e^{-\frac{\kappa A}{C m d} t} + \frac{Q_1 d}{\kappa A} \quad \dots (7)$$

この式 (7) を基に、表 2 に示した圧力に応じた熱伝導率から、負荷がかかり始めてからのバルク体 4 1 と冷却板 4 2 の温度差の時間変化を計算した結果を次の図 7 に示す。

【0061】

10

図 7 は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の磁気支持装置のバルク体と冷却板の温度差変化予測図であり、図 7 (a) は圧力が 1 [Pa] の場合、図 7 (b) は圧力が 10 [Pa] の場合、図 7 (c) は圧力が 30 [Pa] の場合、図 7 (d) は圧力が 100 [Pa] の場合を示す図である。

【0062】

この結果、仮定した条件においてバルク体の冷却特性は、30 [Pa] 以上でありあまり変わらない。このため、この条件では、圧力を 30 [Pa] に設定することで、風損を増加させずに効率よく冷却できると推定できる。30 [Pa] においては、冷却板とバルク体の温度差は約 10 時間で 19 [K] で平衡しているため、バルク体を 50 [K] に保つには、冷却板を 31 [K] 程度に設定する必要がある。

20

【0063】

温度勾配導管部には輻射シールド板の温度定点を取り付けているので、その部分は 50 K 程度となる。内槽室温部から回転軸を通しての熱侵入 Q_3 は、熱伝導積分値を用いて、次式 (8) のように計算できる。

【0064】

$$Q_3 = \int \lambda (T) dT \quad \dots (8)$$

式中、 $\lambda (T)$ は回転軸材料の熱伝導率、 T は温度を表す。

【0065】

また、温度勾配導管部からの熱侵入 Q_3 を考慮して次式 (9) を解くことで、必要な冷凍能力及び冷却時間を計算することができる。

30

【0066】

$$m C dT / dt = \lambda (T) d^2 T / dx^2 + Q_3 + Q_4 - Q_{ref} \quad \dots (9)$$

式中、 m は材料の質量、 C は比熱、 t は時間、 x は導管部の長さ、 Q_4 は輻射による熱侵入、 Q_{ref} は冷凍能力を表す。 Q_4 は次式 (10) で与えられる。

【0067】

$$Q_4 = \sigma A (T_h^4 - T_c^4) \varepsilon / (1 - \varepsilon) \quad \dots (10)$$

式中、 σ はシュテファンボルツマン係数、 ε は放射率、 A は表面積、 T_h は高温側温度、 T_c は低温側温度を表す。

【0068】

常温～極低温部分の回転軸は熱伝導を抑えるために FRP 製とする。その場合は、 Q_3 は 0.01 W 程度になる。また、仮に内槽の温度を 50 K とした場合、内部の回転体 (20 K) への輻射による熱侵入は 0.02 W と見積もることができる。

40

【0069】

また、 Q_{ref} は、住友重機械工業製の 4 K 冷凍機 (RDK-415D, 60 Hz) のロードマップを参照すると、輻射シールドの冷却の場合、第 1 ステージでは 60 W で 50 K、第 2 ステージでは 1.5 W で 4.2 K であった。これらを上記の計算式にあてはめて計算すると、回転体に若干の温度差は生じるものの、内槽内部を 20 K に冷却することは可能である。

【0070】

このように、超電導体を用いて構成した磁気支持装置 (高温超電導磁気軸受) 9, 12

50

を内槽 8 内に配置する。

【0071】

また、内槽 8 には希薄ガスを導入して、固定側の径方向支持用超電導バルク体 3 2 を冷却し、十分に冷却された固定側からの分子伝導冷却と輻射冷却によって、回転体側の浮上用安定化超電導体 3 1 及び固定側の超電導体を冷却して、その分子伝導冷却で回転側を冷却する。

【0072】

このように構成することで、磁気支持が安定かつ恒久的に可能になる。この磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）9, 12 でフライホイール 10 を支持することで回転抵抗を小さくして効率の良い電力貯蔵を行うことができる。

10

【0073】

図 8 は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の第 1 の非接触磁気力トルク伝達部品を示す図であり、図 8 (a) はその上面図、図 8 (b) は図 8 (a) の B-B 線断面図である。

【0074】

これらの図において、51 は磁石、52 はケース用蓋、53 はケース本体、54 は回転盤である。

【0075】

この非接触磁気力トルク伝達部品は、8 極の磁気反発型磁気カップリングクラック装置として構成されている。

20

【0076】

次いで、本発明の実施例の計算（トルク伝達機構の実用性試算）結果について説明する。

1. まず、計算式について説明する。

(1) 蓄積エネルギー

(2) 必要トルク・回転動力算出式

$$\Delta E = I (\omega_1^2 - \omega_2^2) / 2 \quad \dots (11)$$

$$I = (1/2) m (r_{out}^2 - r_{in}^2)$$

式中、 ΔE はフライホイールから取り出せるエネルギー量 (J)、 I は慣性モーメント (kg m^2)、 ω_1 はエネルギー取り出し開始時の角速度 (rad/s)、 ω_2 はエネルギー取り出し終了時の角速度 (rad/s)、 m はフライホイール質量 (kg)、 r_{in} はフライホイール内半径 (m)、 r_{out} : フライホイール外半径 (m) である。

30

【0077】

上記したフライホイール形状から算出した負荷慣性より、回転速度変化（最大回転速度と最低回転速度及び速度変化に要する時間）を定義して加速（減速）時のトルクを算出する。なお、回転速度変化は一定とする。

【0078】

$$T = [2\pi (n_1 - n_2) / 60] G D^2 / 4 t \quad \dots (12)$$

$$G D^2 = \pi \rho L D^4 / 8 = m (2R)^2 / 2$$

式中、 T は加速・減速トルク (kg m)、 $G D^2$ は回転体の負荷慣性 (kg m^2)、 n_1 は最大回転速度 (rpm)、 n_2 は最小回転速度 (rpm)、 t は回転速度変化時間 (s)、 ρ はフライホイール (FW) の密度 (kg/m^3)、 L は FW 厚さ (m)、 D は FW 直径 (m)、 R は FW 半径 (m)、 m : FW 質量 (kg) である。

40

【0079】

ここで、算出した加速（減速）時のトルクと、回転速度変化から、そのトルク及び回転速度変化に必要な電動機動力を算出する。

【0080】

$$P = 2\pi (n_1 - n_2) / 60 T \quad \dots (13)$$

式中、 P は所要動力 (W) である。

2. 次に、計算結果について説明する。

50

【0081】

図9は本発明の具体的な超電導フライホイール蓄電装置の特性図である。

【0082】

事例1：

〔計算条件〕

- (1) 上記した図8の非接触磁気力伝達機構で計算する。
- (2) フライホイール質量：50kg（回転軸も含め100kgと置く）
- (3) フライホイール外半径：150mm（円板形状）
- (4) フライホイール厚さ：95mm（直径300mm，厚さ95mmのSUS）
- (5) GD^2 （回転体の負荷慣性）は4.5kgm²
- (6) 回転速度は3000rpm～1500rpm

10

〔計算結果〕

磁気力伝達機構のトルク伝達能力を、以下の図9に示す。カップリング間隔を20mmとすると、およそ18Nmのトルクが伝達可能である。

【0083】

蓄積エネルギー量は43kJ（12Wh）、0rpm～3000rpmの速度変化におけるトルクと電動機出力の関係は、図10に示す通りであった。

【0084】

$GD^2 = 4.5 \text{ kgm}^2$ から、通常の誘導電動機を想定すると、5.5kW以上が必要となる。この時の最大トルクは、18Nm程度であり、図8の装置の伝達トルク範囲内であることが分かる。

20

【0085】

図11は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の第2の非接触磁気力トルク伝達部品を示す図であり、図11(a)はその上面図、図11(b)は図11(a)のC-C線断面図である。

【0086】

これらの図において、61は磁石、62はケース用蓋、63はケース本体、64は磁石仕切り板、65は回転盤である。

【0087】

この非接触磁気力トルク伝達部品は、ハルバッハ配列の磁石装置を有するカップリングクラック装置であり、コンパクトで、高い伝達トルクを得ることができる。

30

【0088】

図8及び図11に示した非接触磁気力トルク伝達機構により、内槽8内のフライホイール10の回転エネルギーを電動／発電機1に伝達する。そのため、回転エネルギーから電気エネルギーへの変換部分が内槽8内に存在せず、冷却に要するエネルギーを削減することができる。

【0089】

図12は本発明の実施例を示す超電導フライホイール蓄電装置の高温超電導パワーリードの構成図であり、図12(a)はその平面図、図12(b)は図12(a)のD-D線断面図である。

40

【0090】

この図において、71は高温超電導バルク体、72はその高温超電導バルク体71を内装する樹脂層、73，74は両端に配置される銅端子、75，76，77，78は銅端子73，74に形成される穴であり、この穴75，78または76，77にはボルトが嵌められて輻射シールド槽5の蓋部5Aのパワーリード温度アンカ5Bに固定され、穴76，77または75，78は内部の各部品に接続される配線（図示なし）と接続される。

【0091】

なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づき種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

【産業上の利用可能性】

50

【0092】

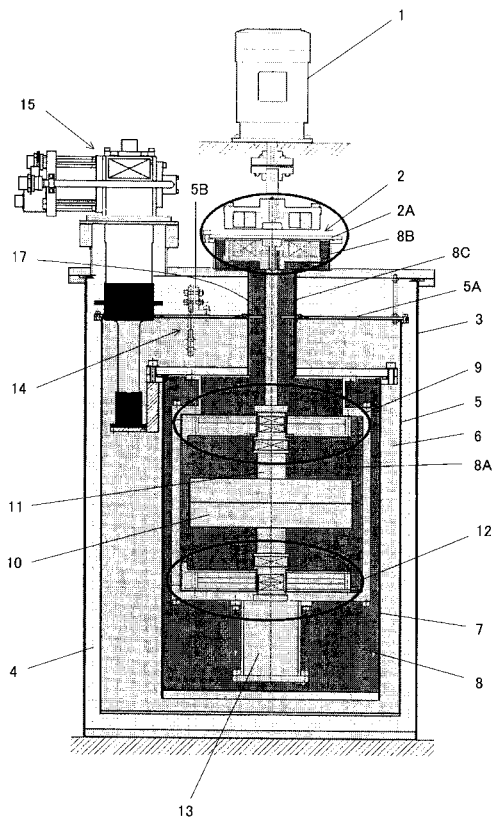
本発明の超電導フライホイール蓄電装置は、超電導体を使用した磁気支持装置によって回転体を支持し、電力を回転体の運動エネルギーとして蓄積するフライホイール蓄電装置として利用可能である。

【符号の説明】

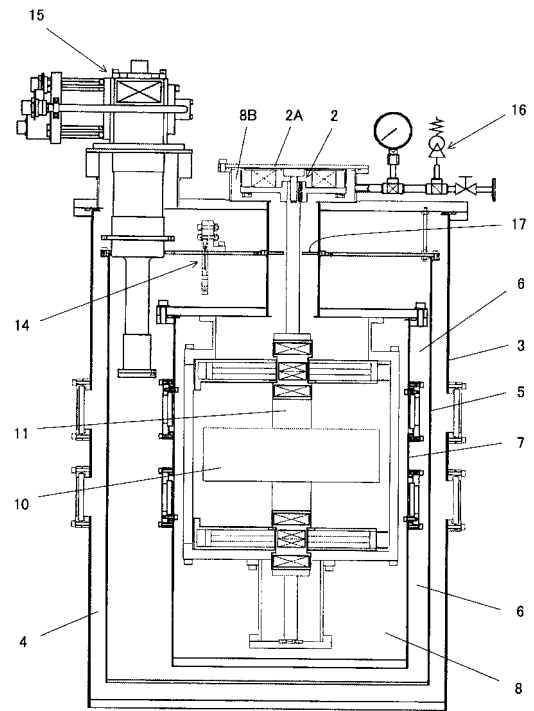
【0093】

1	電動／発電機	
2	非接触磁気力トルク伝達部品	
3	真空容器	
4	真空槽（断熱槽）	10
5	シールド容器	
5 A	輻射シールド槽の蓋部	
5 B	温度定点用アンカ	
6	輻射シールド槽（中間温度槽）	
7	内槽容器	
8	内槽（極低温槽）	
8 A	内槽中央部	
8 B	内槽室温部	
8 C	温度勾配導管部	
9	上部磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）	20
10	フライホイール	
11	回転軸	
12	下部磁気支持装置（高温超電導磁気軸受）	
13	バックアップスラスト軸受部	
14	高温超電導パワーリード	
15	極低温用冷凍機	
16	内槽真空換気／ガス置換装置	
17	バッフル板	
21	超電導コイル	
22	超電導コイルの中央部の円筒状空間部	30
23	上部冷却板	
24	下部冷却板	
25, 26	電極	
27	クライオスタット側取付け面	
31	浮上安定化用超電導体（ロータ）	
32	径方向支持用超電導バルク体（ステータ）	
33	クライオスタット側取付け座面	
41	バルク体	
42	冷却板	
51, 61	磁石	40
52, 62	ケース用蓋	
53, 63	ケース本体	
54, 65	回転盤	
64	磁石仕切り板	
71	高温超電導バルク体	
72	樹脂層	
73, 74	銅端子	
75, 76, 77, 78	穴	

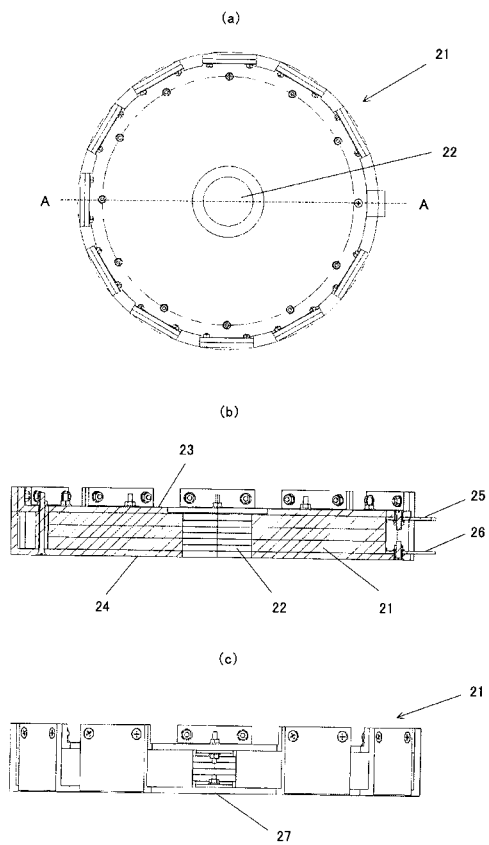
【図 1】



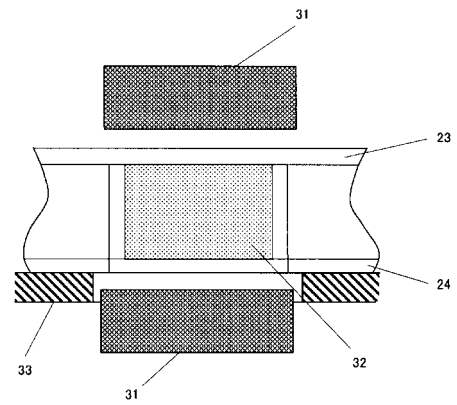
【図 2】



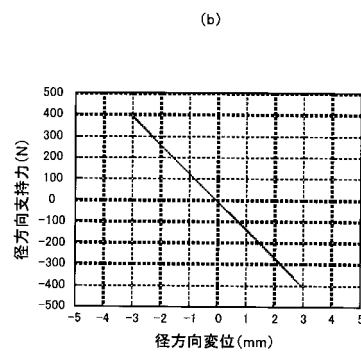
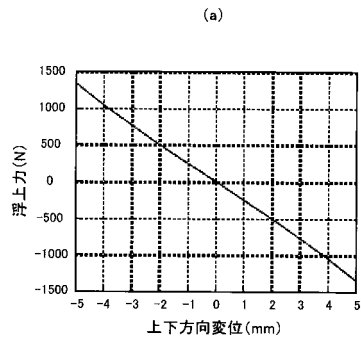
【図 3】



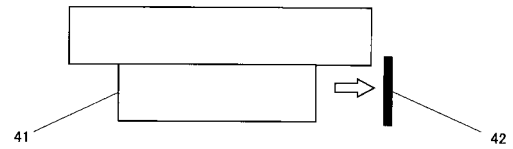
【図 4】



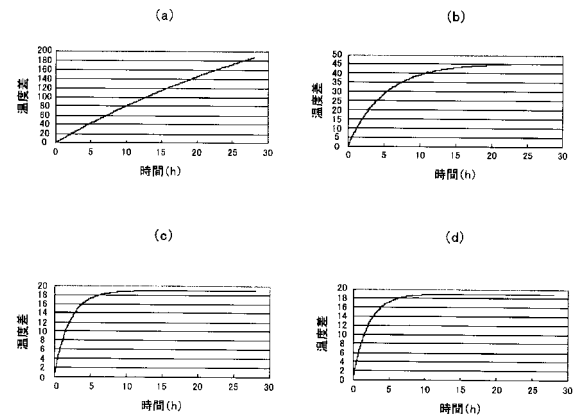
【図 5】



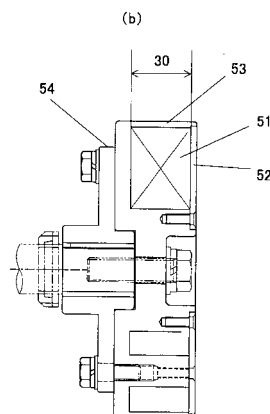
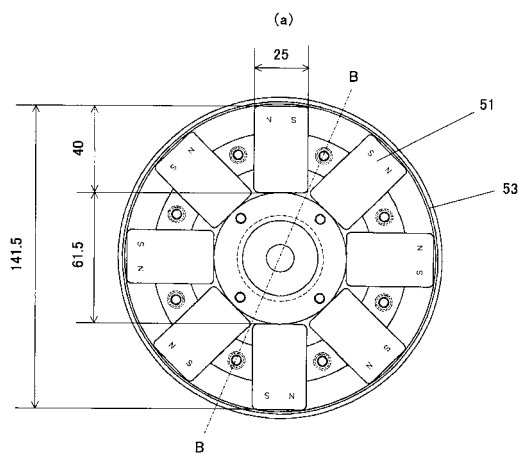
【図 6】



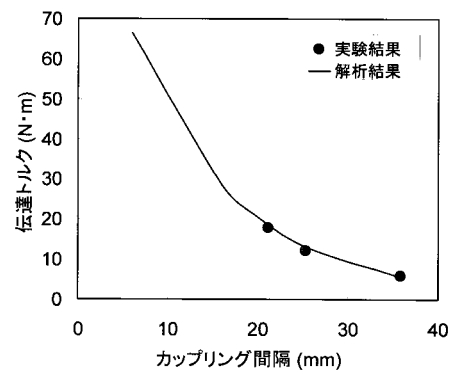
【図 7】



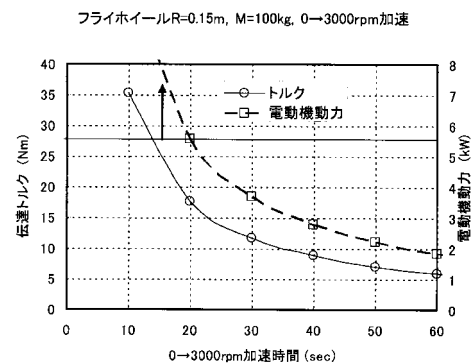
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

- (72)発明者 田中 芳親
東京都国分寺市光町二丁目８番地３８ 財団法人 鉄道総合技術研究所内
- (72)発明者 宮崎 佳樹
東京都国分寺市光町二丁目８番地３８ 財団法人 鉄道総合技術研究所内
- (72)発明者 長谷川 均
東京都国分寺市光町二丁目８番地３８ 財団法人 鉄道総合技術研究所内