

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2014年3月20日(20.03.2014)

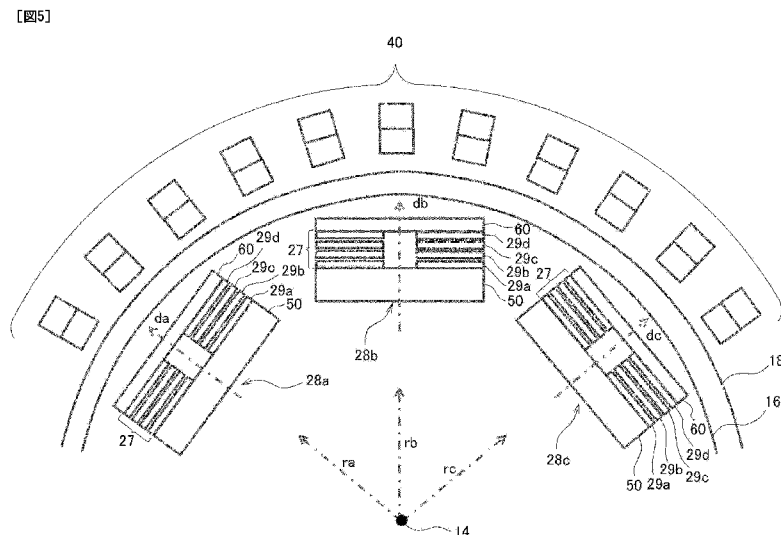


(10) 国際公開番号
WO 2014/041768 A1

- (51) 国際特許分類:
H02K 55/04 (2006.01)
 - (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/005257
 - (22) 国際出願日: 2013年9月5日(05.09.2013)
 - (25) 国際出願の言語: 日本語
 - (26) 国際公開の言語: 日本語
 - (30) 優先権データ:
特願 2012-199466 2012年9月11日(11.09.2012) JP
 - (71) 出願人: 川崎重工業株式会社 (KAWASAKI JUKOGYO KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒6508670 兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号 Hyogo (JP). 国立大学法人 東京海洋大学 (NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION TOKYO UNIVERSITY OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1088477 東京都港区港南四丁目5番7号 Tokyo (JP).
 - (72) 発明者: 村瀬 陽平(MURASE, Yohei). 梅本 勝弥(UMEMOTO, Katsuya). 和泉 充(IZUMI, Mitsuru). 都築 啓太(TSUZUKI, Keita).
 - (74) 代理人: 特許業務法人 有古特許事務所(PAT-AGENT CORPORATE BODY ARCO PATENT OF- FICE); 〒6500031 兵庫県神戸市中央区東町123番地の1 貿易ビル3階 Hyogo (JP).
 - (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
 - (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: SUPERCONDUCTING FIELD-POLE MAGNET

(54) 発明の名称: 超電導界磁極



(57) Abstract: Superconducting field-pole magnets (28a to 28c) have: a superconducting coil body (27) obtained by helically winding a superconducting wire material; a ferromagnetic outer-side magnetic field-deflecting member (60) disposed on an end face on the outer side of a rotor of the superconducting coil body in the radial direction; and a ferromagnetic inner-side magnetic field-deflecting member (50) disposed on an end face on the inner side of a rotor of the superconducting coil body in the radial direction.

(57) 要約: 各超電導界磁極(28a~28c)は、超電導線材を渦巻き状に巻回してなる超電導コイル体(27)と、超電導コイル体の回転子の径方向外側の端面に配置された強磁性の外側磁場転向部材(60)と、超電導コイル体の回転子の径方向内側の端面に配置された強磁性の内側磁場転向部材(50)と、を有する。



WO 2014/041768 A1

明 細 書

発明の名称：超電導界磁極

技術分野

[0001] 本発明は、超電導界磁極に関する。

背景技術

[0002] 回転電機 (electrical rotating machine) は、一般的に、固定子(stator)と、回転子 (rotor) と、該回転子及び該固定子を支持する筐体(housing)とから成る電動機又は発電機である。回転電機は、超電導現象が生じない常電導コイルを使用する常電動回転電機 (normal conducting electrical rotating machine) と、超電導現象が生じる超電導コイルを使用する超電導回転電機(superconducting electrical rotating machine)とに分類することができる。なお、超電導回転電機は、主として、常電導巻線を使用した複数相の電機子巻線が周方向に配置された円筒状の固定子と、当該固定子の内部空間に当該固定子と同軸状に配設され、当該固定子の当該電機子巻線の複数の相と対向するように周方向に超電導コイルを使用した複数の界磁極 (超電導界磁極) とが配置された、所謂ラジアルギャップ(radial gap)型の構造を呈している。超電導回転電機の回転子は、内側円筒体であるロータコア(rotor core)と、該ロータコアの外周を取り囲む外側円筒体であるケーシングとが、該ロータコアの中心軸上に連結されたロータシャフト (rotor shaft) により回転自在に支持されている。また、超電導回転電機の回転子は、ロータコアとケーシングとの間に減圧空間が形成されており、この減圧空間内に超電導界磁極が配置されている。

[0003] 超電導界磁極 28 は、図 14 に示すように、互いに対向する 1 対の直線部分 (30 a, 30 b) と、直線部分 (30 a, 30 b) の両端を連結した互いに対向する 1 対の円弧部分 (30 c, 30 d) とから成るレーストラック (race track) 型コイル 29 を複数積層した構造となっている。具体的には、図 14 に示す超電導界磁極 28 は、4 層のレーストラック型コイル 29 a

～29dを積層した超電導コイル体であり、各層のレーストラック型コイル29a～29dは、図示しない長円形状の巻枠に対してテープ状（帯状）の超電導線材31をレーストラック形状となるように渦巻き（蚊取り線香）状にパンケーキ巻し、所謂磁気回路を構成しない空芯構造となっている。さらに、図14に示すレーストラック型コイル29a～29dそれぞれの断面は、ダブルパンケーキ巻に伴い2層構造となっている。即ち、超電導線材31の断面の長手方向（平行方向）がレーストラック型コイル29の積層方向となり、且つ超電導線材31の断面の短手方向（垂直方向）がレーストラック型コイル29の径方向となるように、レーストラック型コイル29の積層方向に2層の超電導線材31が形成されており、且つ当該2層の超電導線材31がレーストラック型コイル29の径方向内側から径方向外側に向けて配列されたような形状となっている。なお、レーストラック型コイル29は、ダブルパンケーキ巻による2層構造の他に、シングルパンケーキ巻により1層構造となる場合もある。

[0004] 以上のような超電導界磁極28の構造において、超電導線材31の性能指標の一つである臨界電流は、超電導線材31のテープ幅広面（主面）に対して主に垂直方向（レーストラック型コイルの径方向）に作用する磁場（以下、垂直磁場という）の強さに依存し、当該垂直磁場の強さが大きくなると、当該臨界電流が減少するという課題が知られている。図15は、垂直磁場が発生する状況を表した模式図である。

[0005] 一方、特許文献1には、高温超電導テープ材を用いた高温超電導コイルユニットを複数個積層した高温超電導コイル体の両端に、強磁性体として例えばケイ素鋼板などの鉄製のフランジを取り付けた高温超電導マグネットが開示されている。このように、高温超電導コイル体の両端に強磁性体を取り付けられる場合、コイル巻線部の磁界は強磁性体に向かうことになる。この結果、強磁性体を取り付けられない高温超電導マグネットと比べると、強磁性体を取り付けられた高温超電導マグネットは、高温超電導テープ材の磁界による臨界電流密度の低下が小さく、且つ高温超電導マグネットの発生磁界が

高まるとされている。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開平7-142245号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] ところで、特許文献1に開示された超電導コイルは、マグネットに使用されている。従って、ラジアルギャップ型の超電導回転電機における垂直磁場による臨界電流の減少抑制策については全く言及していない。また、特許文献1に開示された超電導コイルは、単極のみでの使用を前提としているので、ラジアルギャップ型の超電導回転電機における複数極の超電導界磁極としての使用を前提していない。このため、複数極間における磁気的な相互影響や、回転子側の超電導界磁極と固定子側の電機子との磁気的連成について考慮されておらず、ラジアルギャップ型の超電導モータの臨界電流及び出力の向上を図る上でさらなる改善の余地があった。

[0008] 本発明は、このような課題を解決するためになされたもので、その第1の目的は、回転子を超電導化し且つ固定子を常電導化したラジアルギャップ型の超電導回転電機において、垂直磁場による臨界電流の減少を抑制することである。また、その第2の目的は、回転子を超電導化し且つ固定子を常電導化したラジアルギャップ型の超電導回転電機において、他の超電導界磁極の相互影響を考慮に入れて、線材の垂直磁場の低減を図ることで臨界電流を向上させるとともに、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させることで出力向上を図ることである。

課題を解決するための手段

[0009] 前記目的を達成するために、本発明のある態様(aspect)に係る超電導界磁極は、複数相の電機子巻線が周方向に配置された円筒状の固定子の内部空間に当該固定子と同軸状に配設される超電導回転電機の回転子において、前記

電機子巻線の複数の相に対応するように周方向に配置された複数の超電導界磁極であって、各前記超電導界磁極は、超電導線材を渦巻き状に巻回してなる超電導コイル体と、前記超電導コイル体の前記回転子の径方向外側の端面に又は端面の近傍に配置された、前記超電導コイル体よりも強磁性の外側磁場転向部材と、前記超電導コイル体の前記回転子の径方向内側の端面に又は端面の近傍に配置された、前記超電導コイル体よりも強磁性の内側磁場転向部材と、を有する、ものである。

[0010] ここで、「～の中心軸が～の径方向を向く」とは、「～の中心軸の延在方向と～の径方向とが一致する」ことを意味する。また、「端面に又は端面の近傍に配置」とは、「端面に接触 (in contact with) 又は端面に隣接 (adjacently) する」ことを意味する。なお、超電導コイル体の端面にギャップを介して外側磁場転向部材及び内側磁場転向部材が配置される場合とは、端面に接触ではなく端面に隣接する方を指す。

[0011] 前記超電導界磁極の構成によれば、ラジアルギャップ型の超電導回転電機において、強磁性の外側及び内部磁場転向部材が超電導コイル体に向かう磁束を引き付けることで、線材の垂直磁場を低減させ、臨界電流を向上させることが可能となり、また、強磁性体が超電導コイル体の近傍にあることで発生磁束が大きくなり、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させることで出力向上を図ることが可能となる。

[0012] 前記超電導界磁極において、前記内側磁場転向部材の体積が前記外側磁場転向部材の体積よりも大きい、としてもよい。

[0013] 前記超電導界磁極の構成によれば、回転子の周方向で隣接した超電導界磁極（以下、隣極という）の磁場分布の影響を考慮に入れて、隣極との距離が近い方（影響力が強い方）の内側磁場転向部材の体積を、隣極との距離が遠い方（影響力が弱い方）の外側磁場転向部材の体積よりも大きくしたことにより、隣極の磁場分布の影響を低減させることが可能となる。また、この結果として、強磁性材料が超電導コイル積層体の近傍にあることで発生磁束が大きくなり、超電導コイル積層体の回転子の径方向内側の端面から径方向外

側の端面に向かう磁束の強さ、ひいては回転子の超電導コイル積層体から固定子の電機子巻線に向かう磁束の強さを大きくすることが可能となる。また、隣極と近い超電導コイル積層体の外周部における超電導線材の垂直磁場を低減するとともに、当該外周部において超電導界磁極から電機子巻線に向かうように磁束を転向させることができる。

[0014] これらの理由により、ラジアルギャップ型の超電導回転電機において、他の超電導界磁極の相互影響を考慮に入れて、線材の垂直磁場の低減を図ることで臨界電流を向上させることが可能となり、また、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させることで出力向上を図ることが可能となる。

[0015] 前記超電導界磁極において、前記外側磁場転向部材は、前記超電導コイル積層体の前記回転子の径方向外側の端面の全面に亘って配置され、且つ中央部が外周部より厚い板状に形成されている、としてもよい。ここで、超電導コイル積層体の端面の全周に亘って中央部が厚く且つ外周部が薄くなっていることに限らず、端面の全周のうち少なくとも一部の範囲で中央部が厚く且つ外周部が薄くなっていればよい。

[0016] 前記超電導界磁極の構成によれば、中央部が外周部より厚い板状（円錐状、円錐台状、半球状、大径円柱体の一方の端面に小径円柱体を同軸状に連設させた形状など）の外側磁場転向部材を採用したことにより、超電導コイル積層体の各層のレーストラック型コイルを構成する超電導線材の垂直磁場を低減させ、超電導コイル積層体の磁場分布を電機子とより鎖交しやすい方向に転向させることが可能となる。言い換えると、漏れ磁束を有効磁束として利用することが可能となる。

[0017] 前記超電導界磁極において、前記外側磁場転向部材は、前記中央部が一定の厚みを有し、前記中央部から前記外周部に近づくにつれて薄くなるように形成されている、としてもよい。

[0018] 前記超電導界磁極の構成によれば、外側磁場転向部材の形状を中央部から外周部に近づくに連れて厚みが薄くなるテーパ状（円錐台状など）とする

ことにより、中央部が外周部よりも厚い板状の外側磁場転向部材を容易に作製することができる。

[0019] 前記超電導界磁極において、前記内側磁場転向部材は、前記超電導コイル積層体の前記回転子の径方向内側の端面の全面に亘って配置され、且つ中央部が外周部より厚い板状に形成されている、としてもよい。

[0020] 前記超電導界磁極の構成によれば、外側磁場転向部材と同様に、中央部が外周部より厚い板状（円錐状、円錐台状、半球状、大径円柱体の一方の端面に小径円柱体を同軸状に連設させた形状など）の内側磁場転向部材を採用したことにより、超電導コイル積層体の各層のレーストラック型コイルを構成する超電導線材の垂直磁場をさらに低減させ、超電導コイル積層体の磁場分布を電機子とより鎖交しやすい方向に転向させることが可能となる。言い換えると、漏れ磁束を有効磁束として利用することが可能となる。

[0021] 前記超電導界磁極において、前記内側磁場転向部材は、前記中央部が一定の厚みを有し、且つ前記中央部から前記外周部に近づくにつれて薄くなるように形成されている、としてもよい。

[0022] 前記超電導界磁極の構成によれば、内側磁場転向部材の形状を中央部から外周部に近づくに連れて厚みが薄くなるテーパ状（円錐台状など）とすることにより、中央部が外周部よりも厚い板状の内側磁場転向部材を容易に作製することができる。

[0023] 前記超電導界磁極において、前記内側磁場転向部材及び前記外側磁場転向部材が、Fe-Si-B化合物に銅（Cu）とニオブ（Nb）を複合添加したアモルファス合金を結晶化させることにより作製されたナノ結晶軟磁性材料で構成されていてもよい。

[0024] 前記超電導界磁極の構成によれば、内側磁場転向部材及び外側磁場転向部材を軽量化することができる。

[0025] 前記超電導界磁極において、前記外側磁場転向部材及び前記内側磁場転向部材の両方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いていない形状を有するとしてもよい。

- [0026] 前記超電導界磁極の構成によれば、外側磁場転向部材または内側磁場転向部材の少なくとも一方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いている形状を有する場合と比べて、超電導界磁極から電機子巻線に向かう磁束が内側磁場転向部材及び外側磁場転向部材の中央部を通過しやすくなるように、当該磁束を転向させることができる。これにより、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束をさらに増加させ、超電導回転電機のさらなる出力向上を図ることが可能となる。
- [0027] 前記超電導界磁極において、前記外側磁場転向部材または前記内側磁場転向部材の少なくとも一方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いている形状を有するとしてもよい。
- [0028] 前記超電導界磁極の構成によれば、外側磁場転向部材及び内側磁場転向部材の両方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いていない形状を有する場合と比べて、穴の開いている方の外側磁場転向部材または内側磁場転向部材が、超電導コイル体に向かう磁束をより引き付けることで、超電導界磁極を構成する線材の垂直磁場の最大箇所をより低減させ、ひいては臨界電流をより向上させることが可能となる。

発明の効果

- [0029] 本発明によれば、第1に、回転子を超電導化し且つ固定子を常電導化したラジアルギャップ型の超電導回転電機において、垂直磁場による臨界電流の減少を抑制することができる。第2に、回転子を超電導化し且つ固定子を常電導化したラジアルギャップ型の超電導回転電機において、他の超電導界磁極の相互影響を考慮に入れて、線材の垂直磁場の低減を図ることで臨界電流を向上させることができ、また、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させることで出力向上を図ることができる。

図面の簡単な説明

- [0030] [図1]図1は本発明の実施の形態1に係る超電導界磁極を備えた超電導回転電機の外観例とその内部構造例を示した図である。

[図2]図2は本発明の実施の形態1に係る超電導界磁極を備えた超電導回転電機の構成例を模式的に示した断面図である。

[図3]図3は本発明における磁場転向部材の形状によって実現されるべき超電導界磁極と電機子巻線との双方を鎖交する鎖交磁束を説明するための図である。

[図4]図4は本発明における磁場転向部材の形状を着想するに至った超電導界磁極の磁場分布が隣接する他の超電導界磁極の磁場分布の影響を被ることを説明するための図である。

[図5]図5は本発明の実施の形態1に係る超電導界磁極の構成例を示す図である。

[図6]図6は本発明の実施の形態2に係る超電導界磁極の構成例を示す図である。

[図7]図7は本発明の実施の形態3に係る超電導界磁極の構成例を示す図である。

[図8]図8は本発明の実施の形態4に係る超電導界磁極の構成例を示す図である。

[図9]図9は本発明の実施の形態5に係る超電導界磁極の構成を示す図である。

[図10]図10は比較形態に係る超電導界磁極の構成を示す図である。

[図11]図11は本発明の実施の形態8に係る超電導界磁極の構成を示す図である。

[図12]図12は本発明の実施の形態3に係る超電導界磁極の各寸法並びに外側及び内側磁場転向部材の体積を定義する模式図である。

[図13]図13は、本発明の実施形態1、3、4のそれぞれ対応した解析モデル(磁場転向部材を有する6極モータの1/6モデル)を用いて解析した結果として、各モデルの線材最大磁場の低減率及びモータ出力の増加率を表した図である。

[図14]図14は超電導磁界磁極の構成例を示す図である。

[図15]図15は超電導コイル積層体の各層のレーストラック型コイルを構成する超電導線材の垂直磁場を説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0031] (本発明の着眼点)

本発明者等は、第1に、回転子を超電導化し且つ固定子を常電導化したというラジアルギャップ型の超電導回転電機に特有の構成に着眼し、この特有の構成に適した磁場転向部材の配置を検討した。

[0032] 第2に、回転子を超電導化し且つ固定子を常電導化したラジアルギャップ型の超電導回転電機の超電導界磁極において、他の超電導界磁極の相互影響を考慮に入れて、線材の垂直磁場の低減を図ることで臨界電流を向上させるとともに、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させることで出力向上を図ることが可能な磁場転向部材の形状に着眼した。

[0033] 以下、磁場転向部材の形状の着眼点について図3及び図4を用いて説明する。なお、図3は本発明における磁場転向部材の形状によって実現されるべき超電導界磁極と電機子巻線との双方を鎖交する鎖交磁束を説明するための図である。図4は本発明における磁場転向部材の形状を着想するに至った超電導界磁極の磁場分布が隣接する他の超電導界磁極の磁場分布の影響を被ることを説明するための図である。

[0034] まず、図3に示すように、超電導界磁極28は、複数相の電機子巻線40が円筒状のバックヨーク32の内側周方向に配置された円筒状の固定子18の内部空間に当該固定子18と同軸状に配設される超電導回転電機の回転子16において、電機子巻線40の複数の相に対応するように周方向に複数配置されている。超電導界磁極28は無鉄芯の磁極である。ここで、回転子16の超電導界磁極28と固定子18の電機子巻線40との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させるには、第1の対策として超電導界磁極28の磁場を強くすることと、第2の対策として超電導界磁極28の磁場分布を電機子巻線40とより鎖交しやすい方向に転向させることと、が考えられる。

[0035] 図3を用いて説明すると、磁場転向部材を設けない超電導界磁極28の場合、超電導界磁極と電機子巻線40とをともに鎖交する鎖交磁束は、図3中の矢印付実曲線（ベクトル線）で表される ϕA である。かかる鎖交磁束 ϕA は、曲率が大きくて電機子巻線40に向かう量が少ないので、超電導界磁極の各層を構成するレーストラック型コイルの超電導線材の幅広面（主面）（図14参照）に対して垂直な磁場を大きくさせる。したがって、前述の第1の対策及び前述の第2の対策をとるべく、図3中の矢印付実曲線で表される鎖交磁束 ϕA が、図3中の矢印付点曲線で表されるように曲率が小さくて電機子巻線40に向かう量が多い鎖交磁束 ϕB となるように、超電導界磁極28に設けられる磁場転向部材の形状を検討した。

[0036] この検討過程において、特に、本発明者等は、図4に示すように、回転子16の周方向に配置されている各超電導界磁極28の磁場分布が、回転子16の周方向において隣接した超電導界磁極（以下、隣極という）28の磁場分布の影響を被ることに着眼した。ここで、或る極である超電導界磁極28とその隣極との位置関係において、或る極及び隣極の回転子16それぞれの径方向内側（図4中では内周側）の端面の外周部間の距離は、或る極及び隣極の回転子16の径方向外側（図4中では外周側）の端面の外周部間の距離よりも近いことが分かる。つまり、或る極において、回転子16の径方向内側の端面の外周部は、回転子16の径方向外側の端面の外周部と比べると隣極からの磁場分布の影響が強いといえる。そこで、第1の検討結果を踏まえて、隣極からの磁場分布の影響を抑制することが可能な磁場転向部材の形状を以下の実施の形態で提案する。

[0037] 以下、本発明の実施の形態を、図面を参照しながら説明する。なお、以下では全ての図を通じて同一又は相当する要素には同一の参照符号を付して、その重複する説明を省略する。

（実施の形態1）

[超電導回転電機の構造例]

図1は本発明の実施の形態1に係る超電導回転電機の外観例とその内部構

造例を示す図である。図2は本発明の実施の形態1に係る超電導回転電機の構成例を模式的に示す断面図である。なお、図2に示す超電導回転電機は6相（例えば、U相、V相、W相、X相、Y相、Z相）、6極（永久磁石界磁）、且つスロット数が72個の場合である。なお、超電導回転電機の相数及び極数がそれぞれ2相以上及び4極以上で任意であるのは言うまでもない。また、図2においては、説明を簡略化するために、外側磁場転向部材及び内側磁場転向部材を示していない。外側磁場転向部材及び内側磁場転向部材は後で詳しく説明する。

[0038] 図1に示す超電導回転電機10は、回転子16を超電導化（超電導界磁巻線）して固定子18を常電導化（常電導電機子巻線）したラジアルギャップ型の構造を呈している。超電導回転電機10は、筒状の筐体12と、回転子16と、回転子16の周囲を取り囲むように筐体12の内部に配設された固定子18とを有する。

[0039] 回転子16は、中心軸14を有し、筐体12によって回転自在に支持されたロータシャフト（rotor shaft）20を有する。ロータシャフト20は、中心軸14を中心とする内側円筒体であるロータコア（rotor core）22と外側円筒体であるケーシング24とを支持している。ロータコア22とケーシング24との間には筒状の真空断熱空間が構築されており、この真空断熱空間内にはその周方向に沿って等間隔に複数の磁極対を成した無鉄芯型の超電導界磁極28が配置されている。図2には、6極の場合として、3つの磁極対を有する超電導界磁極28の配置が示されている。また、回転子16には、図示しないが、前述の真空断熱空間内に配置された超電導界磁極28を冷却するための冷却構造が設けられている。この冷却構造において使用される超電導界磁極28を冷却するための冷媒としては例えばヘリウムガスを採用することができる。ロータコア22は、非磁性材料で低温特性に優れた材料、例えば、SUS316から成る中実円柱体の鍛造材料を切削加工して形成される。ケーシング24は、低温に対する断熱性が優れた一又は複数の断熱材層を備えていることが好ましい。

[0040] 固定子 18 は、固定子 18 の中心軸（ロータシャフト 20 の中心軸でもある）14 と平行な軸方向に円環形状の複数の電磁鋼板（例えば、珪素鋼板）を積層し、全体として筒状に形成されたバックヨーク (back yoke) 32 を有する。なお、バックヨーク 32 は、例えば、その軸方向において所定の積層間隔の厚みを有した複数の分割片 (section) に分割されている。バックヨーク 32 の各分割片の内周面にバックヨーク 32 の中心軸 14（ロータシャフト 20 の中心軸でもある）に向けて延びるように、バックヨーク 32 の周方向に間隔を有して配設されたティース 34 が備えられている。バックヨーク 32 の各分割片の内周面においてバックヨーク 32 の周方向で互いに隣り合うティース 34 の間には、固定子 18 の中心軸 14 と平行な方向に略長方形断面のスロット 36（凹状の溝）が延設されている。

[0041] ティース 34 は、非磁性材料、例えば、繊維強化プラスチック (FRP) などの高い機械的強度を有する剛性樹脂材料により形成されている。この他に、ティース 34 は、非磁性金属、例えばステンレスにより形成されてもよい。なお、材料に拘らずに、ティース 34 は、固定子 18 の中心軸 14 と平行な方向に複数の非磁性の薄板を積層して形成されている。このように、ティース 34 が非磁性材料により形成されることで、回転子 16 の回転に伴う磁界の移動によってティース 34 の内部に渦電流が発生することを回避でき、これに伴い、ティース 34 の冷却構造が不要となる。また、ティース 34 の径方向内側端部（回転子 16 に対向する端部）に磁束が集中することも回避できる。

[0042] 各スロット 36 には、各々を識別するためのスロット番号が付与されている。図 2 には、スロット数が 72 個の場合のスロット番号の付与方法が示されている。そして、各スロット 36 には、筐体 12 の径方向外側領域及び径方向内側領域それぞれに、互いに同相である電機子巻線（固定子巻線）40 の単位巻線対が配置されている。なお、バックヨーク 32 の軸方向一端側から見て、径方向外側領域には単位巻線対の一端（始端）が出現し、径方向内側領域には単位巻線対の他端（終端）が出現する。したがって、電機子巻線

40の単位巻線の総数はスロット数と同じ72本である。以下では、各スロット36に配置される電機子巻線40の単位巻線を40(1), 40(2), ..., 40(72)の符号を用いて識別するとともに、各スロット36を36(1), 36(2), ..., 36(72)の符号を用いて説明する。

[0043] 電機子巻線40は、例えば、互いに位相が120°異なるU相巻線、V相巻線、及びW相巻線から成る第1のY(スター)結線と、互いに位相が120°異なり且つ第1のY結線の各相巻線とは位相が60°ずれて配置されるX相巻線、Y相巻線、及びZ相巻線から成る第2のY(スター)結線とを有し、さらに、第1のY結線の中性点と第2のY結線の中性点とが互いに接続されている。例えば、U相巻線は、互いに隣り合う連番のスロット対であり、且つ12個のスロット間隔で現れるスロット対それぞれに配置される。具体的には、U相巻線は、スロット番号1、2、13、14、25、26、37、38、49、50、61、62の各スロット36(1)、36(2)、36(13)、36(14)、36(25)、36(27)、36(37)、36(38)、36(49)、36(50)、36(61)、36(62)に配置される。つまり、U相巻線は、12本の単位巻線40(1)、40(2)、40(13)、40(14)、40(25)、40(26)、40(37)、40(38)、40(49)、40(50)、40(61)、40(62)を直列に接続して構成される。

[超電導界磁極の構成例]

図5は、本発明の実施の形態1に係る超電導界磁極28の構成例を示す図である。

[0044] まず、図5に示す超電導界磁極28において外側磁場転向部材60及び内側磁場転向部材50が設けられる前の構成例を、図14を再び用いて説明する。

[0045] 図14に示す超電導界磁極28は、平面視において(コイルの中心軸の延在方向から見て)、互いに対向する1対の直線部分(30a, 30b)と、直線部分(30a, 30b)の両端を連結した互いに対向する1対の円弧部

分（30c, 30d）とから成るレーストラック（race track）型コイル29を複数積層した構造となっている。具体的には、図14に示す超電導界磁極28は、4層のレーストラック型コイル29a~29dが積層されて形成された無鉄芯型の超電導コイル体である。各層のレーストラック型コイル29a~29dは、図示しない長円形状の巻枠に対してテープ状（帯状）の超電導線材31をレーストラック形状となるように渦巻き（蚊取り線香）状にパンケーキ巻した後、当該巻枠を取り外した空芯構造となっている。なお、超電導コイル体におけるレーストラック型コイル29の積層数は4層に限られない。

[0046] さらに、図14に示すレーストラック型コイル29a~29dそれぞれの断面は、ダブルパンケーキ巻に伴い2層構造となっている。即ち、超電導線材31の断面の長手方向（平行方向）がレーストラック型コイル29の積層方向となり、且つ超電導線材31の断面の短手方向（垂直方向）がレーストラック型コイル29の径方向となるように、レーストラック型コイル29の積層方向に2層の超電導線材31が形成されており、且つ当該2層の超電導線材31がレーストラック型コイル29の径方向内側から径方向外側に向けて配列されたような形状となっている。なお、レーストラック型コイル29は、ダブルパンケーキ巻による2層構造の他に、シングルパンケーキ巻により1層構造となる場合もある。

[0047] つぎに、図5に示す超電導界磁極28の構成例を説明する。

[0048] 図5に示す超電導界磁極28は、超電導回転電機の回転子16において電機子巻線40の複数の相に対応するように周方向に配置され、且つレーストラック型コイルの中心軸が回転子16の径方向を向くように配置されている。このように配置された超電導界磁極28の例として、図5には超電導界磁極28a、超電導界磁極28b、超電導界磁極28cが示されている。超電導界磁極28aは、その超電導コイル体27を成すレーストラック型コイル29a~29dの中心軸daが回転子16の中心軸14を起点とした径方向raを向くように、配置されたものである。同様に、超電導界磁極28bは

、その超電導コイル体 27 を成すレーストラック型コイル 29 a ~ 29 d の中心軸 d b が回転子 16 の中心軸 14 を起点とした径方向 r b を向くように、配置されたものである。同様に、超電導界磁極 28 c は、その超電導コイル体 27 を成すレーストラック型コイル 29 a ~ 29 d の中心軸 d c が回転子 16 の中心軸 14 を起点とした径方向 r c を向くように、配置されたものである。

[0049] また、図 5 に示す超電導界磁極 28 は、4 層分のレーストラック型コイル 29 a ~ 29 d を積層した超電導コイル体 27 の回転子 16 の径方向外側の端面に強磁性の外側磁場転向部材 60 が配置されるとともに、その超電導コイル体 27 の回転子 16 の径方向内側の端面に強磁性の内側磁場転向部材 50 が配置されている。つまり、超電導コイル体 27 の回転子 16 の径方向内側の端面及び回転子 16 の径方向外側の端面それぞれに強磁性の磁場転向部材 (60, 50) を配置して、当該磁場転向部材により超電導コイル体 27 を軸心方向で挟み込むようにしている。これにより、超電導線材 31 の垂直磁場を低減することと(第 1 の対策)、超電導界磁極 28 の磁場を強くすることと(第 2 の対策)、超電導界磁極 28 の磁場分布を電機子巻線 40 とより鎖交しやすい方向に転向させることと(第 3 の対策)、を具現化すべく、磁場転向部材 (60, 50) の形状を任意に変更することが可能となる。なお、副次的な効果として、超電導コイル体 27 の各層に磁場転向部材を配置するのと比べて、回転子 16 の径の拡張を抑制することもできる。

[0050] ここで、「強磁性」とは、外部磁場に対して強く磁化する性質のことをいう。したがって、外側磁場転向部材 60 及び内側磁場転向部材 50 が強磁性を示すことにより超電導コイル体 27 を鎖交する磁束の転向作用が有効に機能する。なお、転向作用の観点で、好ましくは、外側磁場転向部材 60 及び内側磁場転向部材 50 は超電導コイル体 27 よりも強磁性であればよい。強磁性の磁場転向部材 (60, 50) の材質としては、例えば、フェライト、圧粉コア、パーメンジュール粉体、炭素鋼、一般構造用圧延鋼材 (SS400 など)、ニッケル鋼、ケイ素鋼、Fe-Si-B 化合物に銅 (Cu) とニオブ (Nb)

を複合添加したアモルファス合金を結晶化させることにより作製されたナノ結晶軟磁性材料等を採用することができる。

[0051] また、内側磁場転向部材 50 の体積が外側磁場転向部材 60 の体積よりも大きくしている。つまり回転子の周方向で隣接した超電導界磁極（以下、隣極という）の磁場分布の影響を考慮に入れて、隣極との距離が近い方（影響力が強い方）の内側磁場転向部材 50 の体積を、隣極との距離が遠い方（影響力が弱い方）の外側磁場転向部材 60 の体積よりも大きくした。なお、実施の形態 1 の効果を説明するために、図 9 には、外側磁場転向部材 60 と体積が同じである内側磁場転向部材 51 を例示する。なお、図 9 に示す実施の形態 5 は、本実施の形態の他にも、以下の実施の形態の効果を説明するために引用される。

[0052] 以上のような内側磁場転向部材 50 及び外側磁場転向部材 60 の構成により、図 9 に示す実施の形態 5 に比べて、隣極の磁場分布の影響を低減させることが可能となる。また、この結果として、隣極と近い超電導コイル体 27 の内周部における超電導線材 31 の垂直磁場を低減することが出来る。また、図 9 に示す実施の形態 5 に比べて、強磁性体が超電導コイル体 27 の近傍にあることで発生磁束が大きくなり、超電導コイル体 27 の回転子 16 の径方向内側の端面から径方向外側の端面に向かう磁束の強さ、ひいては回転子 16 の超電導コイル体 27 から固定子 18 の電機子巻線 40 に向かう磁束の強さを大きくすることが可能となる。また、図 9 に示す実施の形態 5 に比べて、隣極と近い超電導コイル体 27 の外周部における超電導線材 31 の垂直磁場を低減するとともに、当該外周部において超電導界磁極 28 から電機子巻線 40 に向かうように磁束を転向させることができる。これらの理由により、図 9 に示す実施の形態 5 に比べて、超電導コイル 27 が経線する線材垂直磁場を低減することで臨界電流を向上させるとともに、回転子 16 の超電導界磁極 28 と固定子 18 の電機子巻線 40 との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させ、超電導回転電機 10 の出力向上を図ることが可能となる。

[0053] なお、図 5 には、内側磁場転向部材 50 及び外側磁場転向部材 60 が、共

に、超電導コイル体 27 の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いていない形状を有する構成が示されているが、これは一例であり、本実施の形態では、当該穴は開いていてもよく、開いていなくてもよい。このことは、後述する実施の形態 2-6 でも同様である。なお、当該穴が開いていない形態を実施の形態 7 に示し、当該穴が開いている形態を実施の形態 8 に示す。

[0054] (実施の形態 2)

図 6 は、本発明の実施の形態 2 に係る超電導界磁極 28 の構成例を示す図である。

[0055] 図 6 に示す超電導界磁極 28 では、外側磁場転向部材 61 は、複数のレーストラック型コイル 29 を積層して成る超電導コイル体 27 の回転子 16 の径方向外側の端面の全面に亘って配置されており、且つ中央部が外周部より厚い板状に形成されている。なお、「中央部が外周部より厚い板状」とは、例えば、円錐状、円錐台状、半球状、大径円柱体の一方の端面に小径円柱体を同軸状に連設させた形状が挙げられる。なお、円錐台状の中には、平面視がレーストラック形状であり、且つ側面視が台形状である場合が含まれる。また、超電導コイル積層体 27 の回転子 16 の径方向外側の端面の全周に亘って中央部が厚く且つ外周部が薄くなっていることに限らず、端面の全周のうち少なくとも一部の範囲で中央部が厚く且つ外周部が薄くなっていればよい。

[0056] また、本実施の形態 2 では、外側磁場転向部材 61 及び内側磁場転向部材 51 の体積の関係は特に指定しない。図 6 に示す内側磁場転向部材 51 は、本実施の形態 1 における内側磁場転向部材 50 よりも薄い板状にしているが、これに限られない。

[0057] 以上の外側磁場転向部材 61 の形状によれば、図 9 に示す実施の形態 5 と比べて、超電導界磁極 28 から電機子巻線 40 に向かう磁束が外側磁場転向部材 61 の中央部を通過しやすくなるように、当該磁束を転向させることができる。この結果、超電導コイル体 27 の各層のレーストラック型コイル 29a~29d を構成する超電導線材 31 の垂直磁場を低減させ、超電導コイ

ル体 27 の磁場分布を電機子巻線 40 とより鎖交しやすい方向に転向させることが可能となる。言い換えると、漏れ磁束を有効磁束として利用することが可能となる。

[0058] 特に、外側磁場転向部材 61 は、中央部が一定の厚みを有し、且つ中央部から外周部に近づくにつれて薄くなるような形状に形成されてもよい。かかる形状としては、例えばテーパ状（円錐台状）が挙げられる。以上の外側磁場転向部材 61 の形状によれば、前述した中央部が外周部よりも厚い板状を容易に作製することができる。

[0059] （実施の形態 3）

図 7 は、本発明の実施の形態 3 に係る超電導界磁極 28 の構成例を示す図である。

[0060] 本実施の形態 3 は、本実施の形態 1 と本実施の形態 2 とを組み合わせたものである。つまり、隣極との距離が近い方の内側磁場転向部材 50 の体積を、隣極との距離が遠い方の外側磁場転向部材 61 の体積よりも大きくしている。さらに、外側磁場転向部材 61 は、超電導コイル体 27 の回転子 16 の径方向外側の端面の全面に亘って配置されており、且つ中央部が外周部よりも厚い板状に形成されている。

[0061] 以上の形状によれば、図 9 に示す実施の形態 5 と比べて、超電導コイル体 27 の各層のレーストラック型コイル 29 a ~ 29 d を構成する超電導線材 31 の垂直磁場を低減させることで臨界電流を向上させ、回転子 16 の超電導界磁極 28 と固定子 18 の電機子巻線 40 との双方に鎖交する鎖交磁束をさらに増加させ、超電導回転電機 10 のさらなる出力向上を図ることが可能となる。なお、実施の形態 2 の中で説明したとおり、外側磁場転向部材 61 は、中央部が一定の厚みを有し、且つ中央部から外周部に近づくにつれて薄くなるような形状に形成されてもよいし、レーストラック型コイル 29 の中心軸（ d_a , d_b , d_c ）の延在方向から見て、外側磁場転向部材 61 の一定の厚みを有する部分の外周部がレーストラック型コイル 29 の内周部の近傍に位置してもよい。

[0062] 以下では、図12を参照しながら、本実施の形態3に係る超電導界磁極28の各寸法及び外側及び内側磁場転向部材の体積を規定する条件式を説明する。なお、図12は、本実施の形態3に係る超電導界磁極の各寸法並びに外側及び内側磁場転向部材の体積を定義する模式図である。

[0063] 図12は、6極の超電導モータの1/6モデルを用いて、超電導コイル積層体27の内径（空芯部の径）がaと表され、超電導コイル積層体27の外径（短辺の長さ）がbと表され、超電導コイル積層体27の回転子16の径方向の長さがcと表され、内側磁場転向部材50の径方向の長さがeと表され、外側磁場転向部材61の径方向の長さ（上底幅と下底幅との間の距離）がgと表され、外側磁場転向部材61の上底幅がfと表されている。さらに、図12では、外側磁場転向部材61の体積が V_1 と表され、内側磁場転向部材50の体積が V_2 と表されている。

[0064] ここで、上底幅fの条件式を以下の（式1）で表し、外側及び内側磁場転向部材の体積比を以下の（式2）で表すこととする。

[0065] $0.3b + 0.7a < f < 0.9 + 0.1a \dots$ （式1）

$0.60 < V_1 / V_2 < 0.98 \dots$ （式2）

（実施の形態4）

図8は、本発明の実施の形態4に係る超電導界磁極28の構成例を示す図である。

[0066] 本実施の形態4は、図7に示す本実施の形態3における内側磁場転向部材50の形状を、外側磁場転向部材61と同様に、複数のレーストラック型コイル29を積層して成る超電導コイル積層体27の回転子16の径方向内側の端面の全面に亘って配置されており、且つ中央部が外周部より厚い板状に形成した内側磁場転向部材52の形状に変更したものである。なお、中央部が外周部より厚い板状とは、例えば、円錐状、円錐台状、半球状、大径円柱体の一方の端面に小径円柱体を同軸状に連設させた形状が挙げられる。

[0067] また、外側磁場転向部材61と内側磁場転向部材52との体積の関係は、図7に示す本実施の形態3と同様に、隣極との距離が近い方の内側磁場転向

部材 5 2 の体積を、隣極との距離が遠い方の外側磁場転向部材 6 1 の体積よりも大きくしている。つまり回転子の周方向で隣接した超電導界磁極（以下、隣極という）の磁場分布の影響を考慮に入れて、隣極との距離が近い方（影響力が強い方）の内側磁場転向部材 5 2 の体積を、隣極との距離が遠い方（影響力が弱い方）の外側磁場転向部材 6 1 の体積よりも大きくしている。

[0068] かかる形状によれば、図 9 に示す実施の形態 5 と比べて、超電導コイル体 2 7 の各層のレーストラック型コイル 2 9 a ~ 2 9 d を構成する超電導線材 3 1 の垂直磁場を低減させることで臨界電流を向上させるとともに、超電導界磁極 2 8 から電機子巻線 4 0 に向かう磁束が内側磁場転向部材 5 2 及び外側磁場転向部材 6 1 の中央部を通過しやすくなるように、当該磁束を転向させることができる。これにより、回転子 1 6 の超電導界磁極 2 8 と固定子 1 8 の電機子巻線 4 0 との双方に鎖交する鎖交磁束をさらに増加させ、超電導回転電機 1 0 のさらなる出力向上を図ることが可能となる。なお、本実施の形態 3 の外側磁場転向部材 6 1 と同様に、内側磁場転向部材 5 2 は、中央部が一定の厚みを有し、且つ中央部から外周部に近づくにつれて薄くなるような形状に形成されてもよい。

[0069] （実施の形態 5）

図 9 は、本発明の実施の形態 5 に係る超電導界磁極 2 8 の構成例を示す図である。図 1 0 は比較形態に係る超電導界磁極の構成を示す図である。

[0070] 本実施の形態 5 は、図 5 に示す本実施の形態 3 における内側磁場転向部材 5 0 を、外側磁場転向部材 6 0 と体積が同じである内側磁場転向部材 5 1 に置き換えたものである。一方、比較形態に係る超電導界磁極は、磁場転向部材を備えていない。

本実施の形態 5 のような内側磁場転向部材 5 1 及び外側磁場転向部材 6 0 の構成であっても、ラジアルギャップ型の超電導回転電機において、図 1 0 に記載の磁場転向部材を設けない場合に比べて、強磁性の外側及び内側磁場転向部材が超電導コイル体に向かう磁束を引き付けることで、線材の垂直磁場を低減させ、臨界電流を向上させることが可能となり、また、強磁性体が超

電導コイル体の近傍にあることで発生磁束が大きくなり、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束を増加させることで出力向上を図ることが可能となる。

[0071] (実施の形態6)

本発明の実施の形態6に係る超電導界磁極28は、実施の形態1乃至5のいずれか1つに係る超電導界磁極28において、内側磁場転向部材50、51及び外側磁場転向部材61が、Fe-Si-B化合物に銅(Cu)とニオブ(Nb)を複合添加したアモルファス合金を結晶化させることにより作製されたナノ結晶軟磁性材料で構成されている。これ以外の構成は、実施の形態1乃至5のいずれか1つに係る超電導界磁極28と同じである。このような構成とすると、内側磁場転向部材50、51及び外側磁場転向部材61を軽量化することができる。例えば、内側磁場転向部材50、51及び外側磁場転向部材61の材料がSS400である場合と比べると、発熱量低減効果は同程度である一方、重量を74パーセント程度低減することができる。

[0072] (実施の形態7)

本発明の実施の形態7に係る超電導界磁極は、実施の形態1乃至6のいずれか1つに係る超電導界磁極において、外側磁場転向部材60、61及び内側磁場転向部材50、51、52の両方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いていない形状を有するものである。

[0073] 以上の構成によれば、外側磁場転向部材または内側磁場転向部材の少なくとも一方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いている形状を有する場合と比べて、超電導界磁極から電機子巻線に向かう磁束が内側磁場転向部材及び外側磁場転向部材の中央部を通過しやすくなるように、当該磁束を転向させることができる。これにより、回転子の超電導界磁極と固定子の電機子巻線との双方に鎖交する鎖交磁束をさらに増加させ、超電導回転電機のさらなる出力向上を図ることが可能となる。

[0074] (実施の形態8)

本発明の実施の形態8に係る超電導界磁極は、実施の形態1乃至6のいずれ

れか1つに係る超電導界磁極において、外側磁場転向部材60、61または内側磁場転向部材50、51、52の少なくとも一方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いている形状を有するものである。図11に、実施の形態1において、外側磁場転向部材60及び内側磁場転向部材50が、共に、中央部に穴の開いている形状を有する構成を例示する。

[0075] 以上の構成によれば、外側磁場転向部材及び内側磁場転向部材の両方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いていない形状を有する場合と比べて、穴の開いている方の外側磁場転向部材または内側磁場転向部材が、超電導コイル体に向かう磁束をより引き付けることで、超電導界磁極を構成する線材の垂直磁場の最大箇所をより低減させ、ひいては臨界電流をより向上させることが可能となる。

[0076] (シミュレーション解析)

図13は、比較形態と実施の形態1、3、4、5とにそれぞれ対応した解析モデル(磁場転向部材を有する6極モータの1/6モデル)を用いて解析した結果を表した図である。なお、図13における解析モデルの項目として、解析モデルOは内側磁場転向部材及び外側磁場転向部材が取り付けられていない図10に示す比較形態を表し、解析モデルAは図9に示す実施の形態5を表し、解析モデルBは図5に示す実施の形態1を表し、解析モデルCは図7に示す実施の形態3を表し、解析モデルDは図8に示す実施の形態4を表している。また、図13に示す効果の項目では、解析モデルOの解析結果(線材最大磁場2.298T、モータ出力3.04MW)を基準として、線材最大磁場を低減率の値で示すとともに、モータ出力を増加率の値で示している。図13に示す効果の項目によれば、解析モデルDの線材最大磁場の低減率が最も大きく、解析モデルCのモータ出力の増加率が最も大きいことが分かる。

[0077] 上記説明から、当業者にとっては、本発明の多くの改良や他の実施形態が明らかである。従って、上記説明は、例示としてのみ解釈されるべきであり

、本発明を実行する最良の態様を当業者に教示する目的で提供されたものである。本発明の精神を逸脱することなく、その構造及び／又は機能の詳細を実質的に変更できる。

産業上の利用可能性

[0078] 本発明は、回転子を超電導化し且つ固定子を常電導化し、該固定子に配置される固定子巻線を空芯としたラジアルギャップ型の超電導回転電機にとって有益である。

符号の説明

[0079] 10・・・超電導回転電機

12・・・筐体

14・・・中心軸

16・・・回転子

18・・・固定子

20・・・ロータシャフト

22・・・ロータコア

24・・・ケーシング

27・・・超電導コイル体

28, 28a, 28b, 28c・・・超電導界磁極

29, 29a, 29b, 29c, 29d・・・レーストラック型コイル

30a, 30b・・・直線部分

30c, 30d・・・円弧部分

31・・・超電導線材

32・・・バックヨーク

34・・・ティース

36・・・スロット

40・・・電機子巻線

50, 51, 52・・・内側磁場転向部材

60, 61・・・外側磁場転向部材

請求の範囲

- [請求項1] 複数相の電機子巻線が周方向に配置された円筒状の固定子の内部空間に当該固定子と同軸状に配設される超電導回転電機の回転子において、前記電機子巻線の複数の相に対応するように周方向に配置された複数の超電導界磁極であって、
- 各前記超電導界磁極は、
- 超電導線材を渦巻き状に巻回してなる超電導コイル体と、
- 前記超電導コイル体の前記回転子の径方向外側の端面に又は端面の近傍に配置された、前記超電導コイル体よりも強磁性の外側磁場転向部材と、
- 前記超電導コイル体の前記回転子の径方向内側の端面に又は端面の近傍に配置された、前記超電導コイル体よりも強磁性の内側磁場転向部材と、
- を有する、超電導界磁極。
- [請求項2] 前記内側磁場転向部材の体積が前記外側磁場転向部材の体積よりも大きい、請求項1に記載の超電導界磁極。
- [請求項3] 前記外側磁場転向部材は、前記超電導コイル体の前記回転子の径方向外側の端面の全面に亘って配置され、且つ中央部が外周部より厚い板状に形成されている、請求項2に記載の超電導界磁極。
- [請求項4] 前記外側磁場転向部材は、前記中央部が一定の厚みを有し、且つ前記中央部から前記外周部に近づくにつれて薄くなるように形成されている、請求項3に記載の超電導界磁極。
- [請求項5] 前記内側磁場転向部材は、前記超電導コイル体の前記回転子の径方向内側の端面の全面に亘って配置され、且つ中央部が外周部より厚い板状に形成されている、請求項2乃至4のいずれか1項に記載の超電導界磁極。
- [請求項6] 前記内側磁場転向部材は、前記中央部が一定の厚みを有し、且つ前記中央部から前記外周部に近づくにつれて薄くなるように形成されて

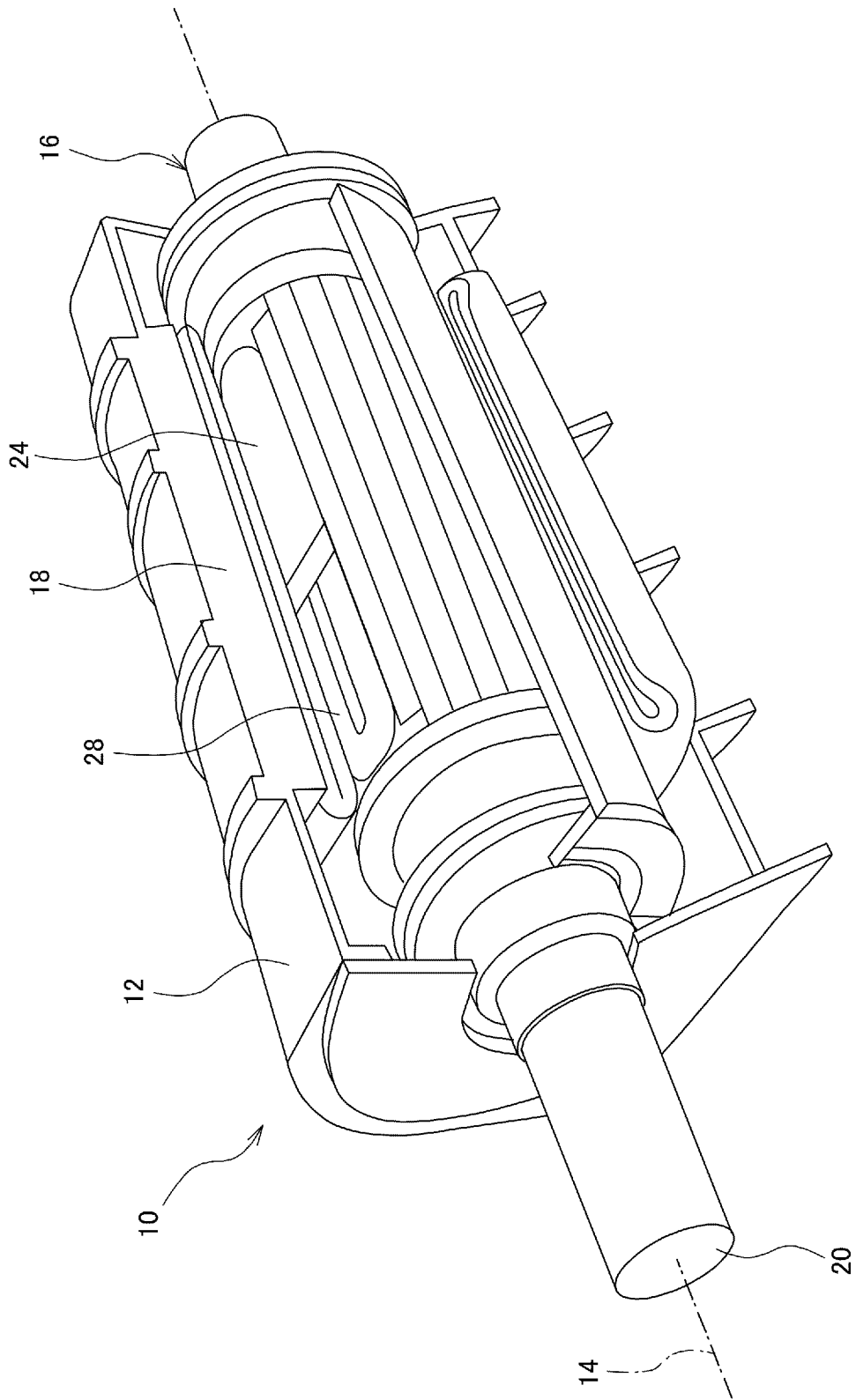
いる、請求項5に記載の超電導界磁極。

[請求項7] 前記内側磁場転向部材及び前記外側磁場転向部材が、Fe-Si-B化合物に銅(Cu)とニオブ(Nb)を複合添加したアモルファス合金を結晶化させることにより作製されたナノ結晶軟磁性材料で構成されている、請求項1乃至6のいずれか1項に記載の超電導界磁極。

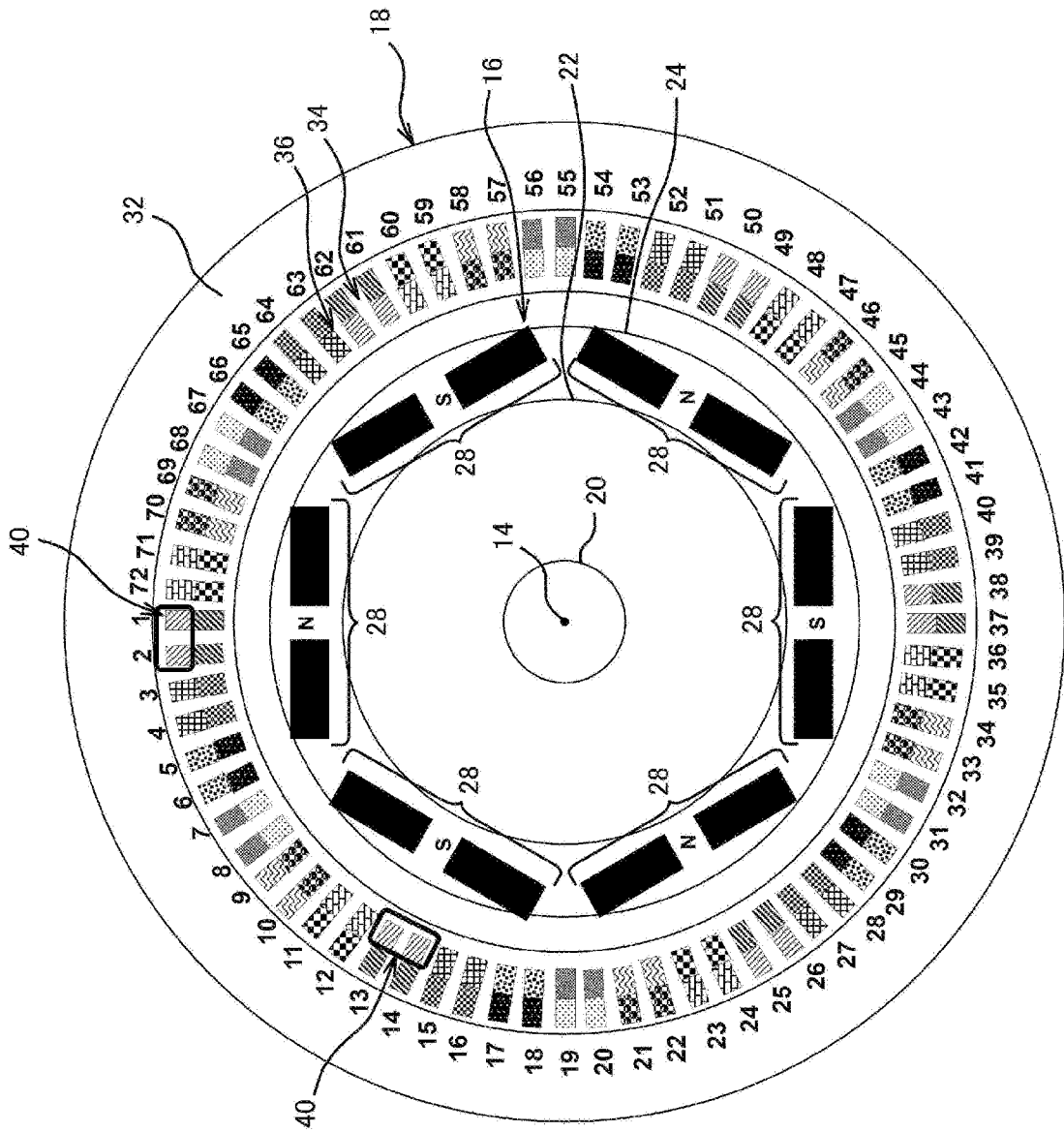
[請求項8] 前記外側磁場転向部材及び前記内側磁場転向部材の両方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いていない形状を有する、請求項1乃至7のいずれか1項に記載の超電導界磁極。

[請求項9] 前記外側磁場転向部材または前記内側磁場転向部材の少なくとも一方が、超電導コイル体の中心軸の延在方向から見て中央部に穴の開いている形状を有する、請求項1乃至7のいずれか1項に記載の超電導界磁極。

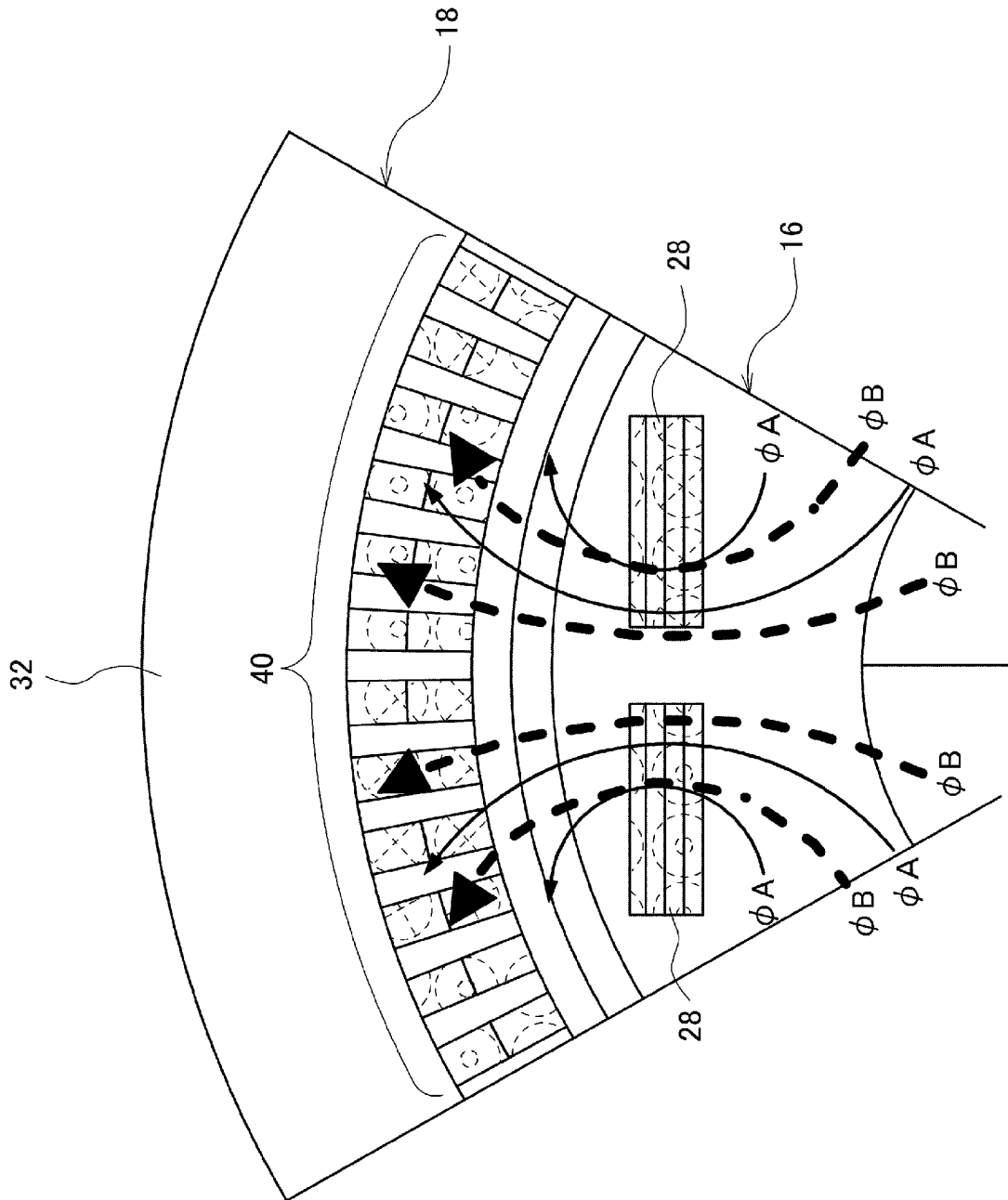
[図1]



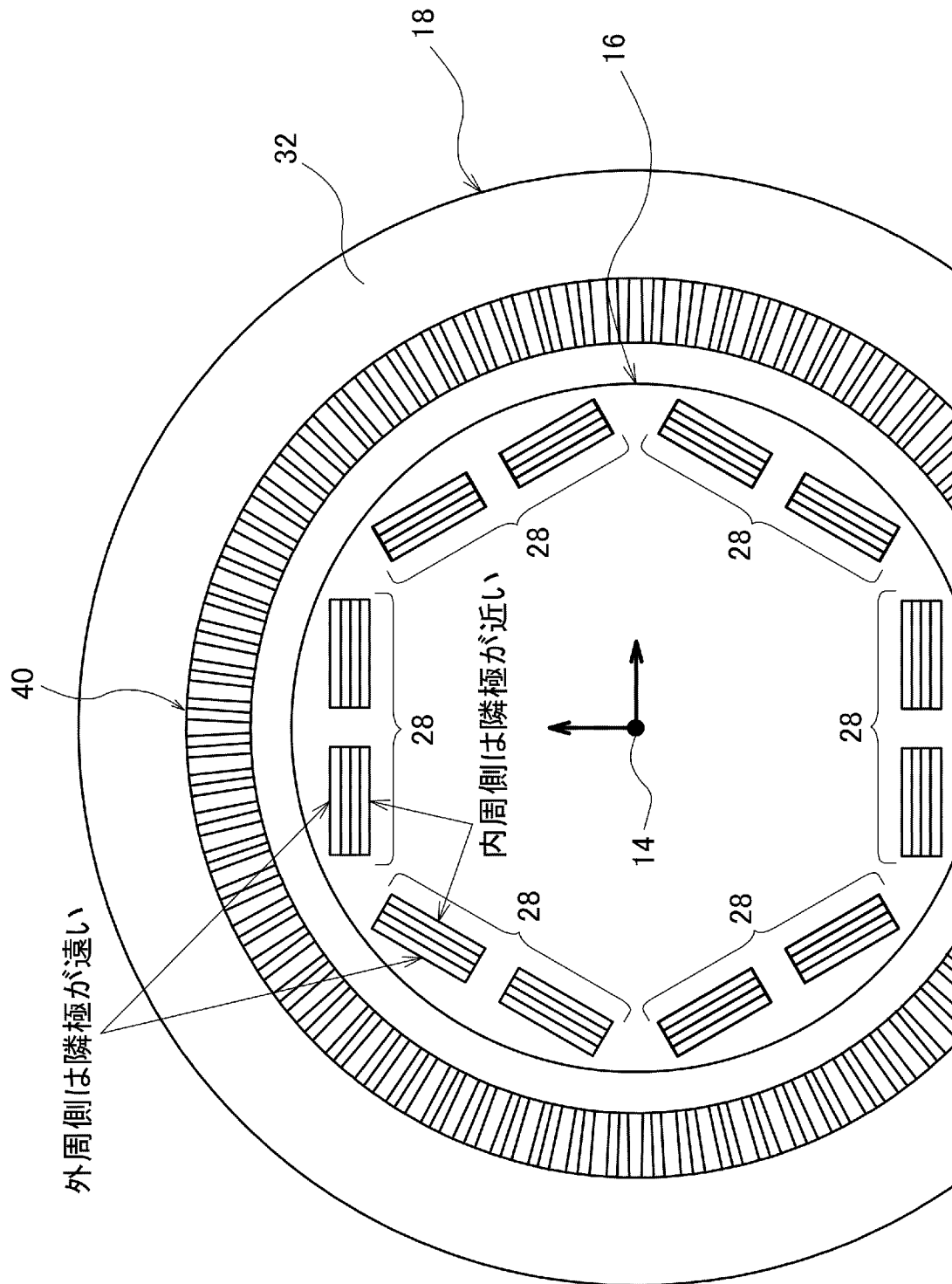
[図2]



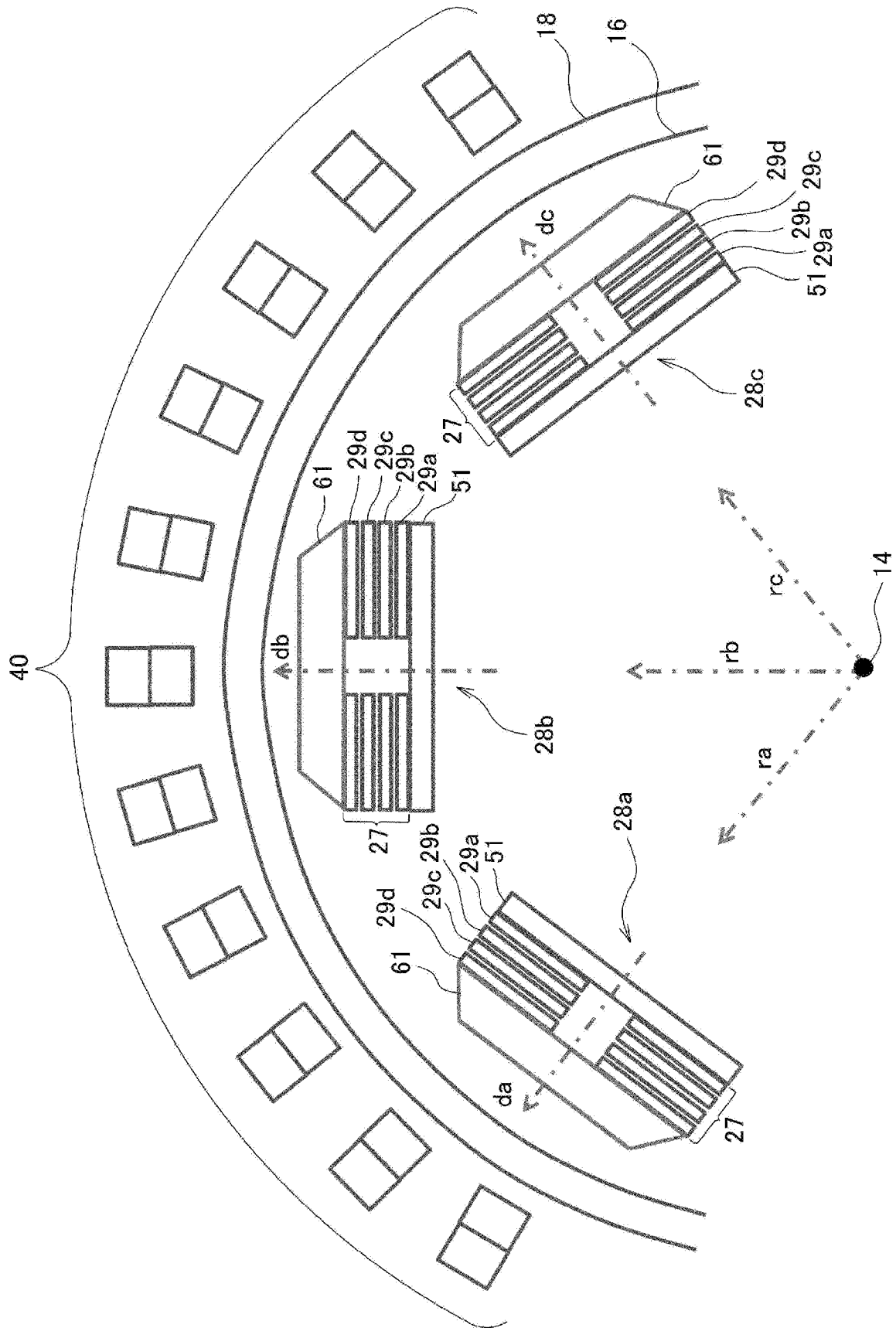
[図3]



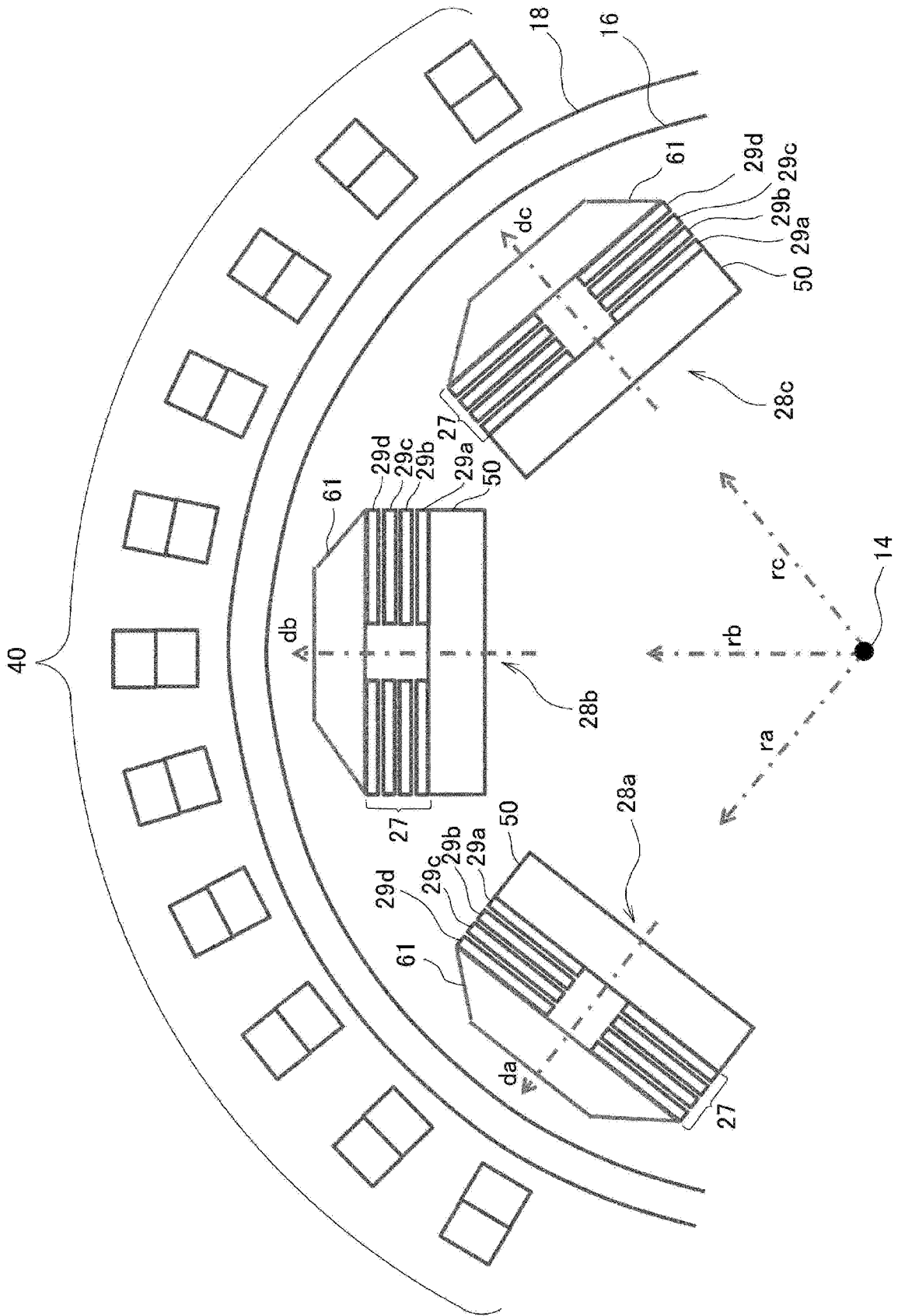
[図4]



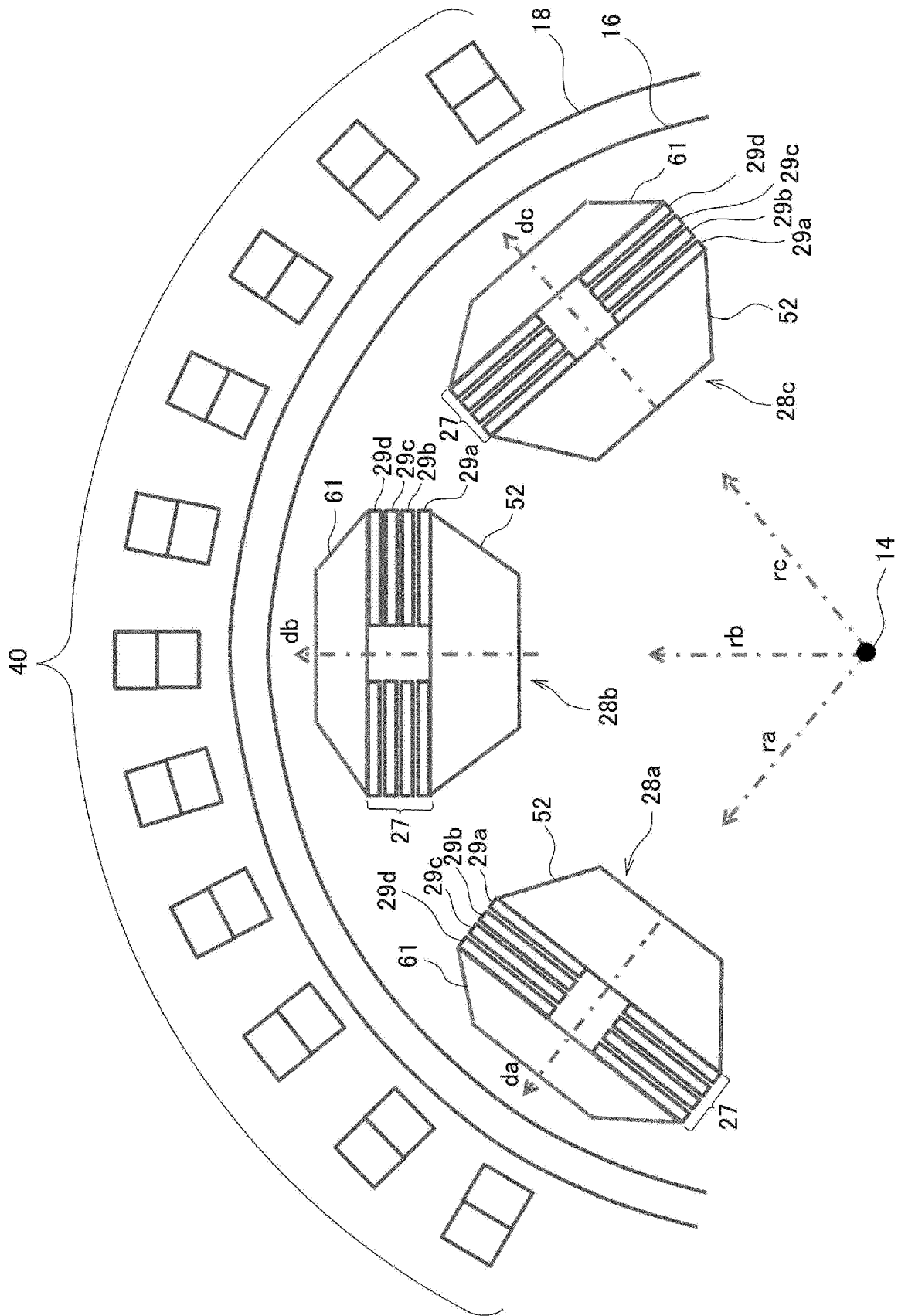
[図6]



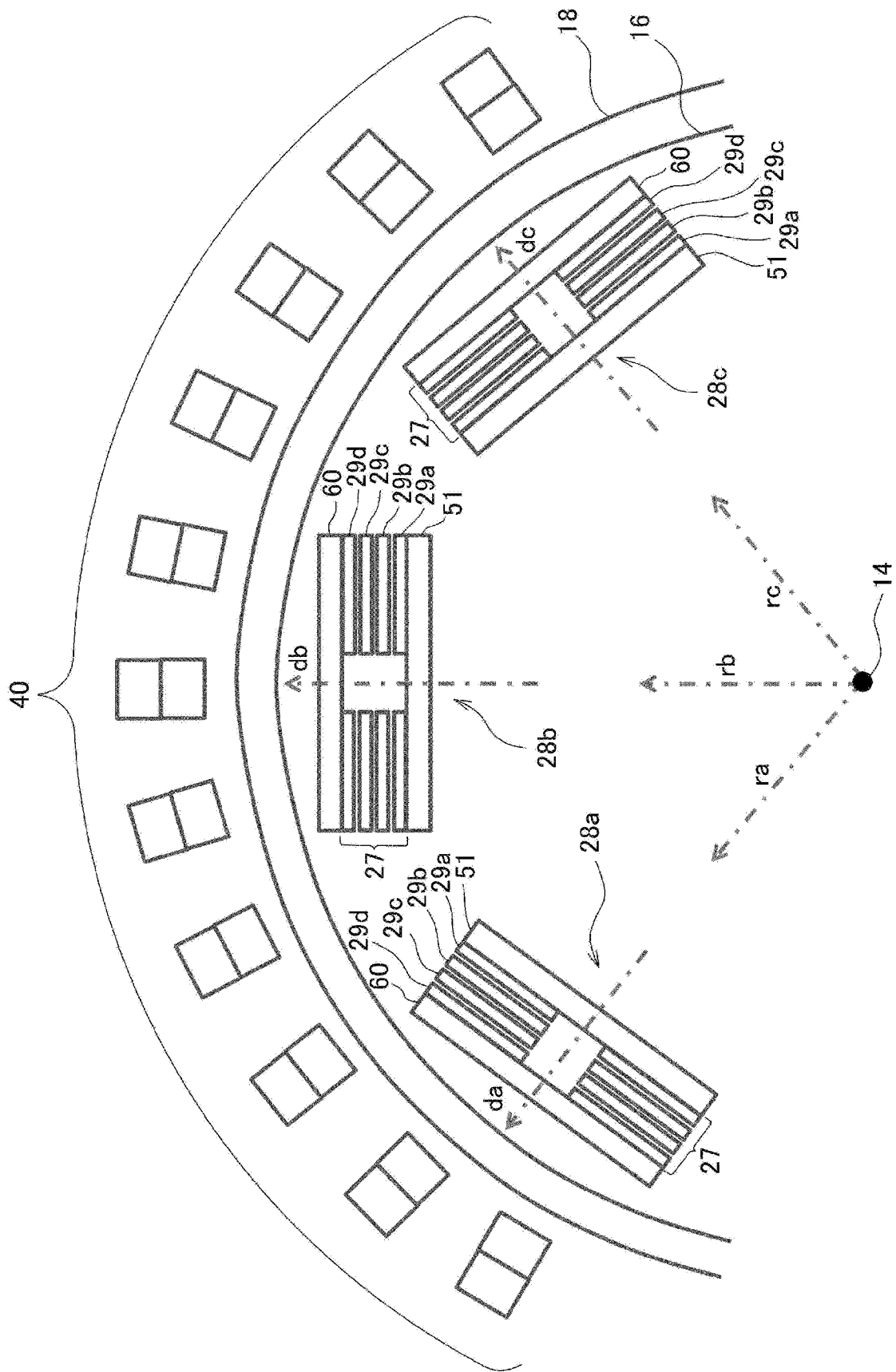
[図7]



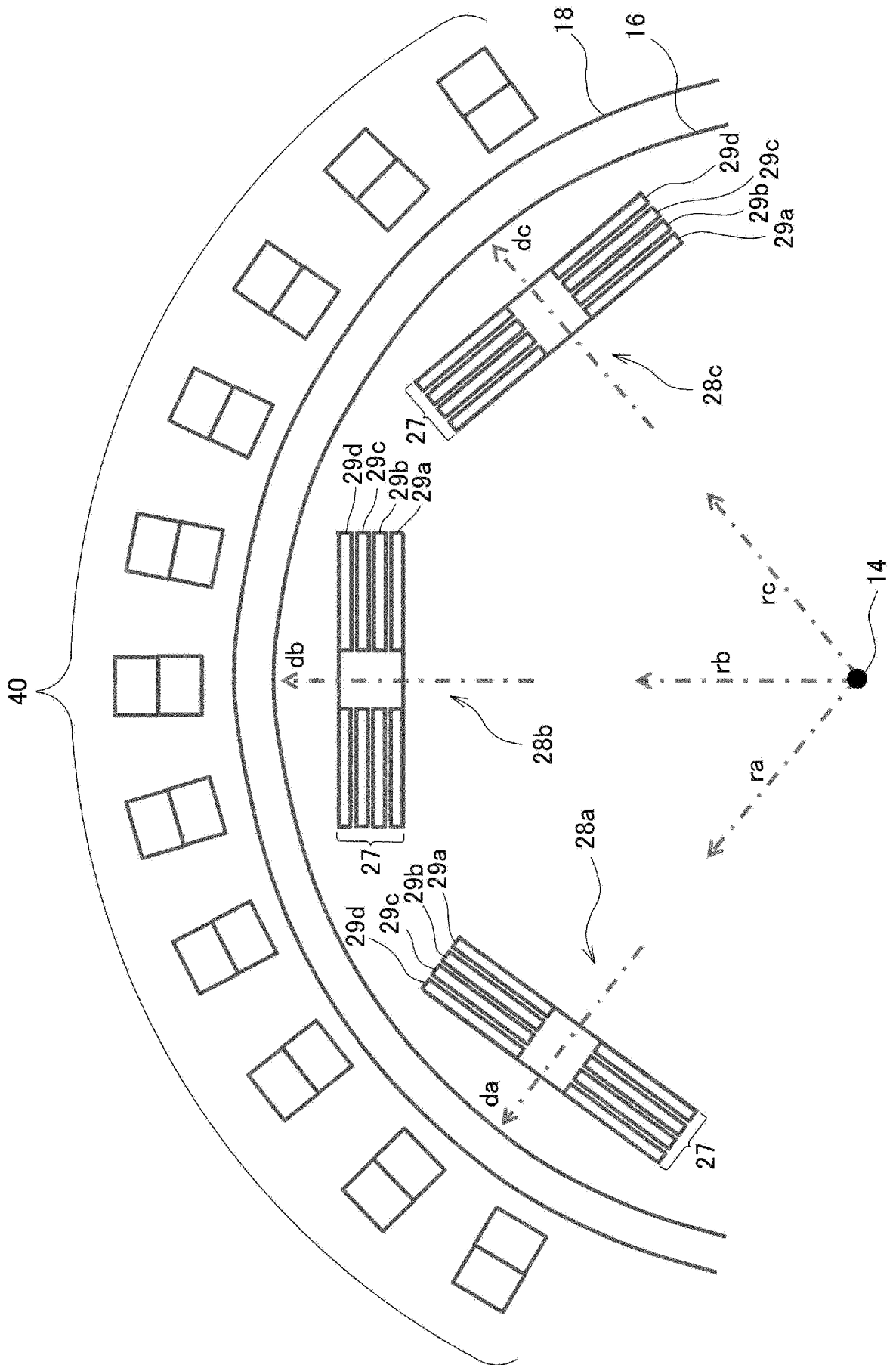
[図8]



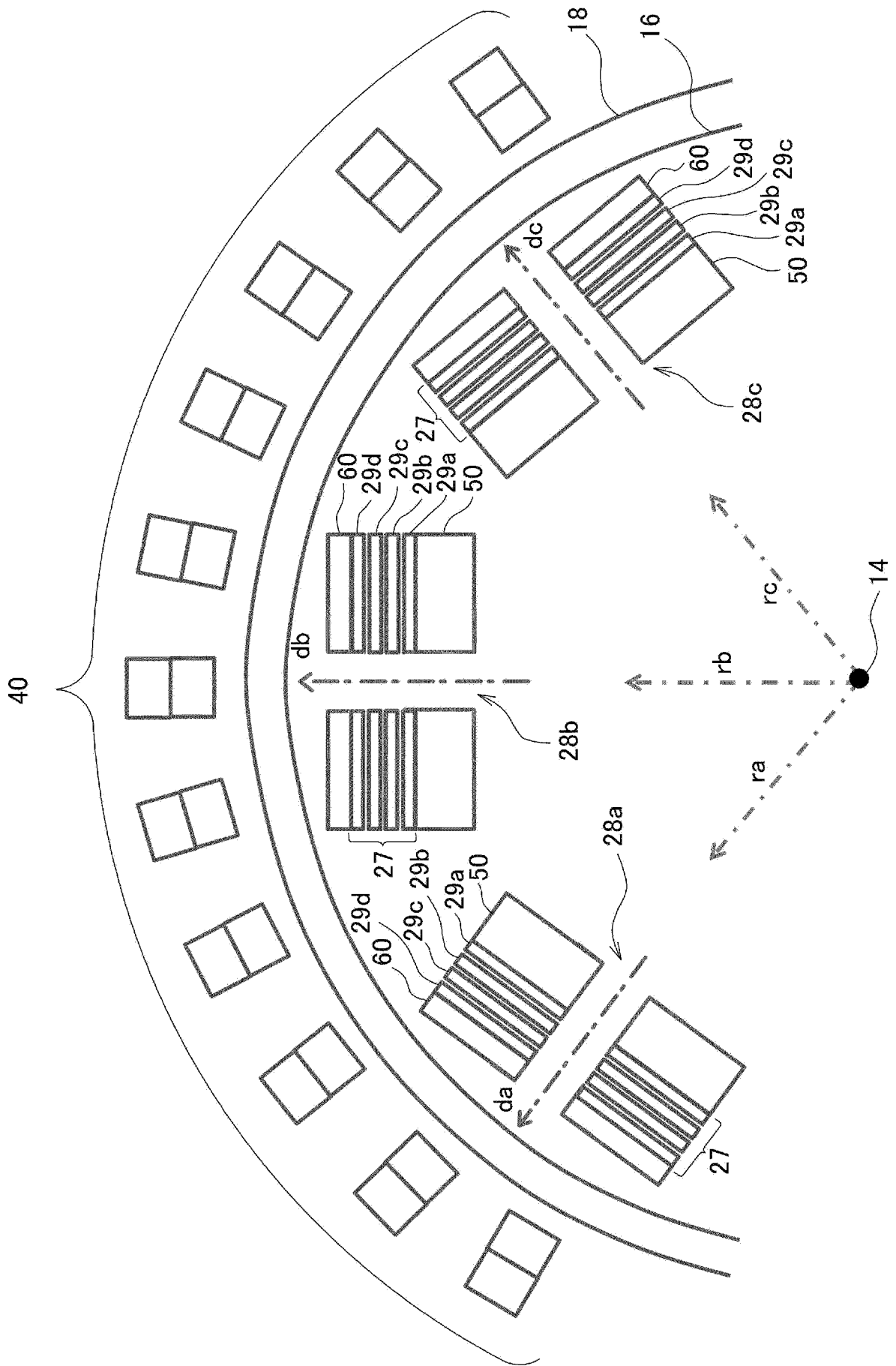
[図9]



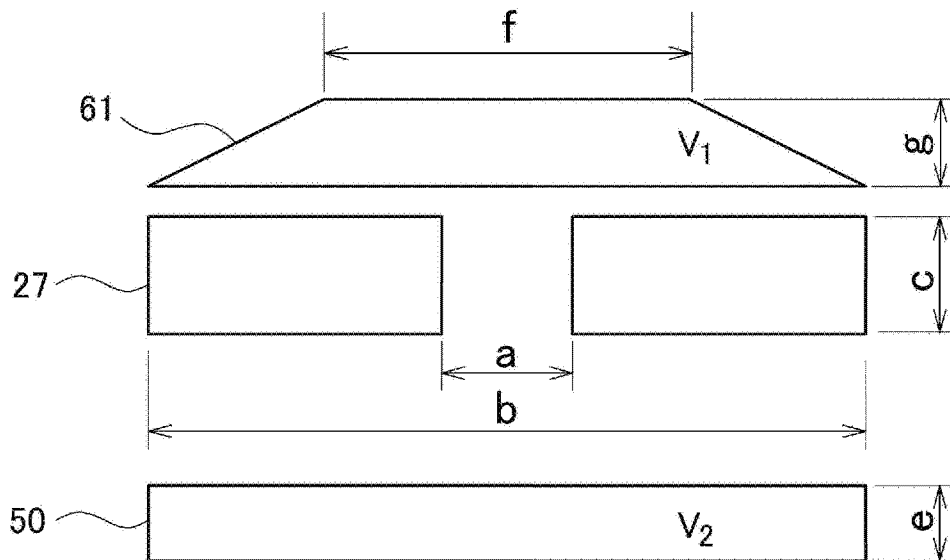
[図10]



[図11]



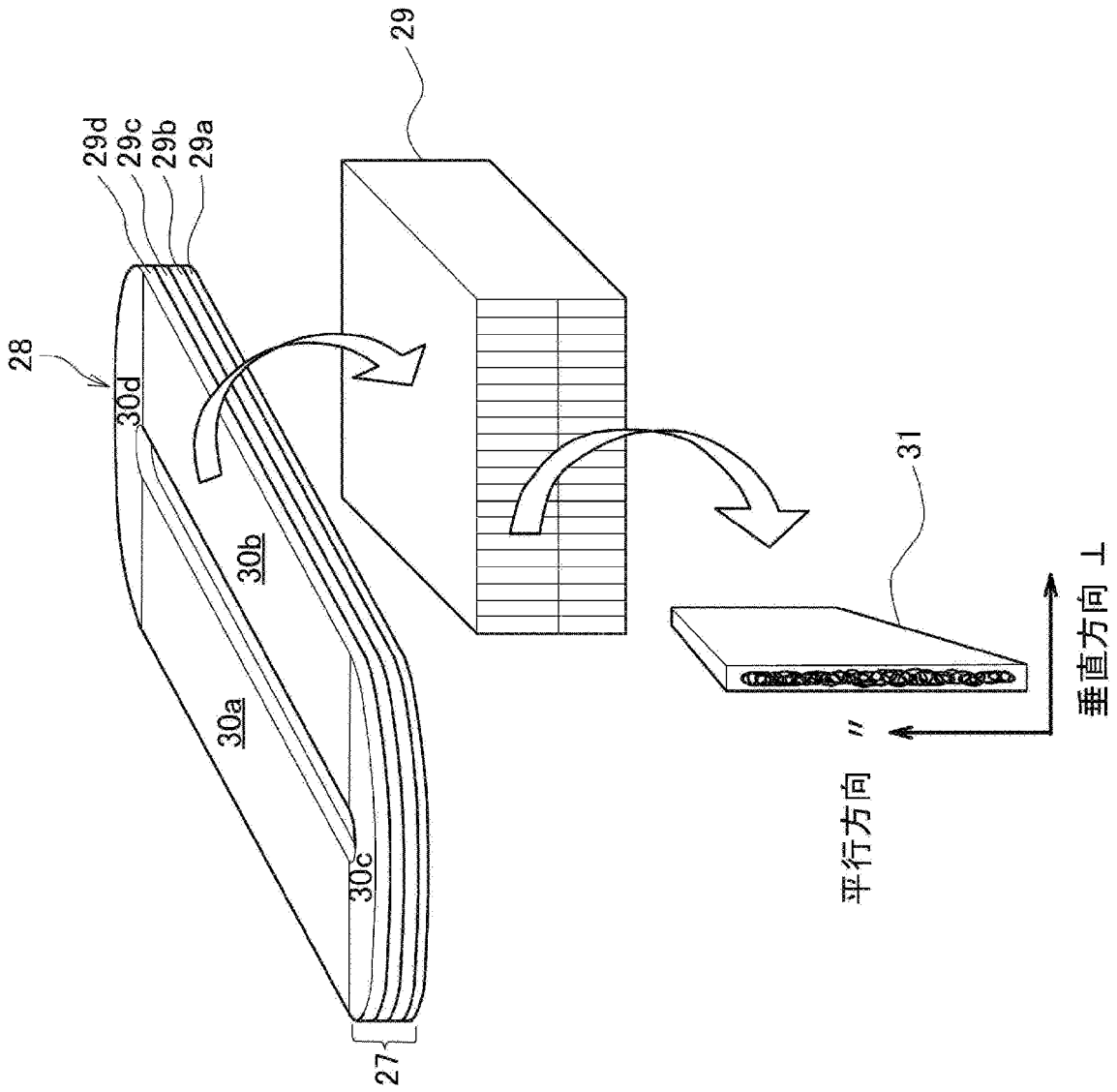
[図12]



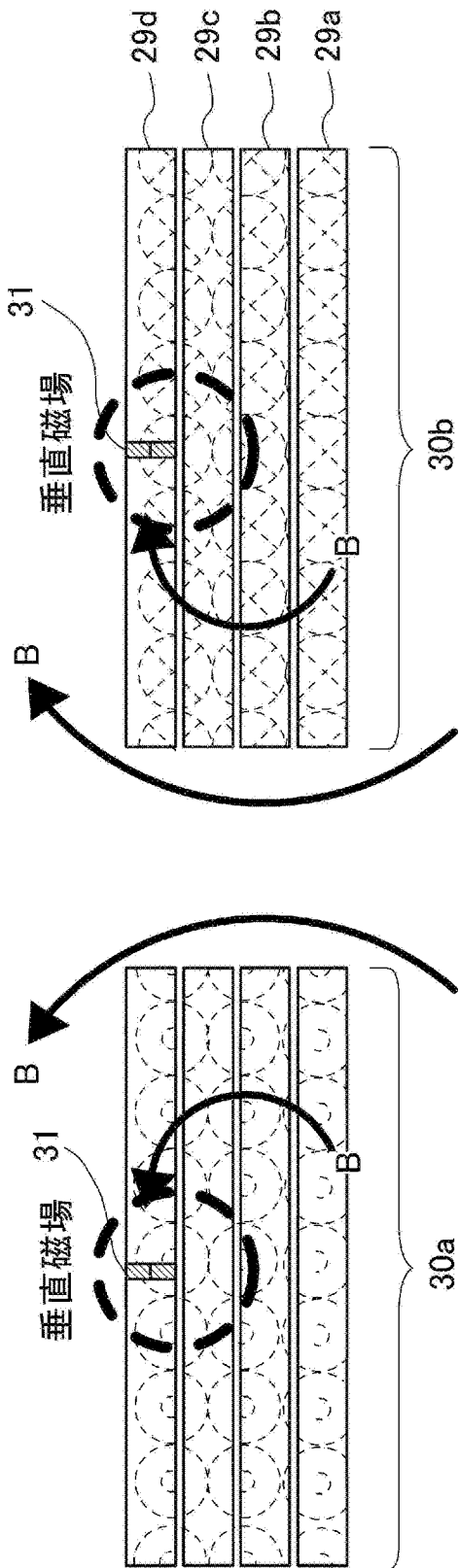
[図13]

解析モデル	磁場転向部材形状		体積比 (断面積比)	効果 [%] (解析モデルA基準)	
	外側	内側	外側/内側	線材最大磁場	モータ出力
O	無し	無し	—	0	0
A	矩形	矩形	1.00	6.57	8.71
B	矩形	矩形	0.83	8.71	9.23
C	台形	矩形	0.77	8.71	11.66
D	台形	台形	0.92	11.30	11.20

[図14]



[図15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2013/005257

<p>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H02K55/04(2006.01) i</p> <p>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC</p>														
<p>B. FIELDS SEARCHED</p> <p>Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H02K55/04</p> <p>Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2013 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2013 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2013</p> <p>Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)</p>														
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:10%;">Category*</th> <th style="width:70%;">Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th style="width:20%;">Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Y A</td> <td>JP 57-162942 A (Mitsubishi Electric Corp.), 06 October 1982 (06.10.1982), page 1, lower left column, line 11 to page 2, lower left column, line 1; fig. 1 to 3 (Family: none)</td> <td>1, 7-9 2-6</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>JP 11-31614 A (Fuji Electric Co., Ltd.), 02 February 1999 (02.02.1999), paragraphs [0012] to [0013]; fig. 1 (Family: none)</td> <td>1, 7-9</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>JP 2003-158009 A (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)), 30 May 2003 (30.05.2003), paragraphs [0002] to [0006]; fig. 3 (Family: none)</td> <td>1, 7-9</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	Y A	JP 57-162942 A (Mitsubishi Electric Corp.), 06 October 1982 (06.10.1982), page 1, lower left column, line 11 to page 2, lower left column, line 1; fig. 1 to 3 (Family: none)	1, 7-9 2-6	Y	JP 11-31614 A (Fuji Electric Co., Ltd.), 02 February 1999 (02.02.1999), paragraphs [0012] to [0013]; fig. 1 (Family: none)	1, 7-9	Y	JP 2003-158009 A (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)), 30 May 2003 (30.05.2003), paragraphs [0002] to [0006]; fig. 3 (Family: none)	1, 7-9
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.												
Y A	JP 57-162942 A (Mitsubishi Electric Corp.), 06 October 1982 (06.10.1982), page 1, lower left column, line 11 to page 2, lower left column, line 1; fig. 1 to 3 (Family: none)	1, 7-9 2-6												
Y	JP 11-31614 A (Fuji Electric Co., Ltd.), 02 February 1999 (02.02.1999), paragraphs [0012] to [0013]; fig. 1 (Family: none)	1, 7-9												
Y	JP 2003-158009 A (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)), 30 May 2003 (30.05.2003), paragraphs [0002] to [0006]; fig. 3 (Family: none)	1, 7-9												
<p><input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.</p>														
<table style="width:100%;"> <tr> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> <p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </td> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p> </td> </tr> </table>			<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>										
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>													
<p>Date of the actual completion of the international search 15 November, 2013 (15.11.13)</p>		<p>Date of mailing of the international search report 26 November, 2013 (26.11.13)</p>												
<p>Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office</p>		<p>Authorized officer</p>												
<p>Facsimile No.</p>		<p>Telephone No.</p>												

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/005257

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2008-231463 A (Hitachi Metals, Ltd.), 02 October 2008 (02.10.2008), paragraphs [0004] to [0005] & US 2010/0098576 A1 & EP 2128292 A1 & WO 2008/114665 A1 & CN 101627141 A & KR 10-2009-0113314 A	7-9
A	US 6066906 A (American Superconductor Corp.), 23 May 2000 (23.05.2000), column 4, line 61 to column 5, line 9; fig. 4 & WO 2000/049704 A1	1-9

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H02K55/04(2006.01)i		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H02K55/04		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2013年 日本国実用新案登録公報 1996-2013年 日本国登録実用新案公報 1994-2013年		
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 57-162942 A (三菱電機株式会社) 1982. 10. 06、1 頁左下欄 11 行 -2 頁左下欄 1 行、第 1-3 図 (ファミリーなし)	1, 7-9 2-6
Y	JP 11-31614 A (富士電機株式会社) 1999. 02. 02、段落 0012-0013、 第 1 図 (ファミリーなし)	1, 7-9
Y	JP 2003-158009 A (独立法人産業技術総合研究所) 2003. 05. 30、段 落 0002-0006、第 3 図 (ファミリーなし)	1, 7-9
<input checked="" type="checkbox"/> C 欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 15. 11. 2013	国際調査報告の発送日 26. 11. 2013	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号 100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号	特許庁審査官 (権限のある職員) 服部 俊樹 電話番号 03-3581-1101 内線 3358	3V 3736

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2008-231463 A (日立金属株式会社) 2008. 10. 02、段落 0004-0005 & US 2010/0098576 A1 & EP 2128292 A1 & WO 2008/114665 A1 & CN 101627141 A & KR 10-2009-0113314 A	7-9
A	US 6066906 A (American Superconductor Corporation) 2000. 05. 23、 第 4 欄、第 61 行-第 5 欄、第 9 行、第 4 図 & WO 2000/049704 A1	1-9