

(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
2018年5月31日(31.05.2018)

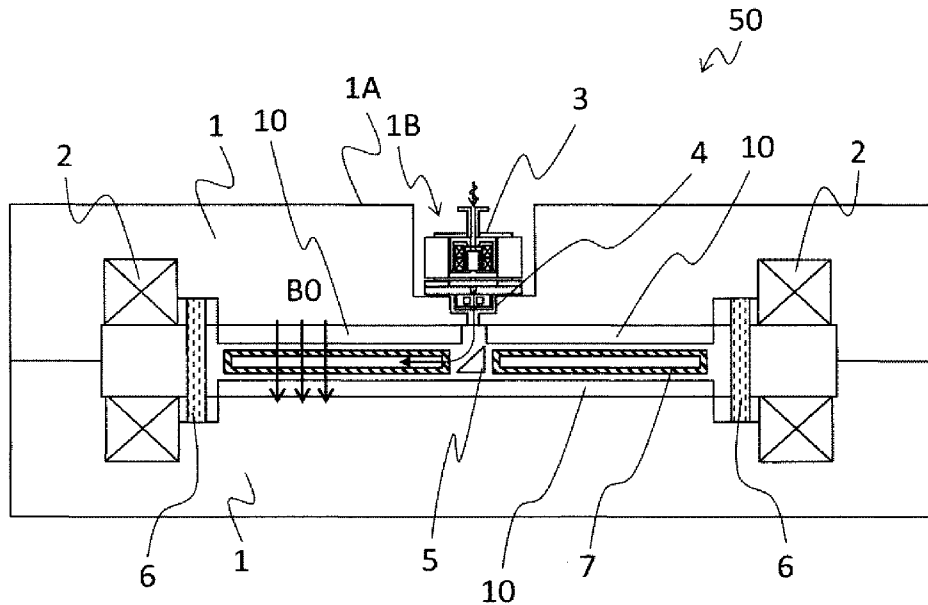


(10) 国際公開番号
WO 2018/096648 A1

- (51) 国際特許分類:
H05H 7/08 (2006.01) H05H 13/02 (2006.01)
G21K 5/04 (2006.01) H05H 13/04 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/084969
- (22) 国際出願日: 2016年11月25日(25.11.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 株式会社日立製作所(HITACHI, LTD.)
[JP/JP]; 〒1008280 東京都千代田区丸の内
一丁目6番6号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 関 孝義(SEKI Takayoshi); 〒1008280 東
京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株
会社日立製作所内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人開知国際特許事務所
(KAICHI IP); 〒1030022 東京都中央区日本橋
室町四丁目3番16号 Tokyo (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, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, 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, TN, 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,

(54) Title: ACCELERATOR AND PARTICLE BEAM IRRADIATION DEVICE

(54) 発明の名称: 加速器および粒子線照射装置



(57) Abstract: In this accelerator 50, a main magnetic pole 1 has a recess 1B in the surface that is on the side of an outer peripheral surface 1A which faces away from the surface opposing another main magnetic pole 1. In an ion source 3, a discharge chamber 105 and a magnetic path 103 are disposed more inward than the outer peripheral surface 1A of the main magnetic pole 1 when the main magnetic pole 1 is viewed from a vertical direction cross section. In other words, the discharge chamber and the magnetic path are disposed in the recess 1B of the main magnetic pole 1. In this manner, a beam line can be shortened, providing an external ion source type accelerator that does not use a large-scale device, and a particle beam irradiation device equipped therewith.



WO 2018/096648 A1

MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, 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：

- 一 国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：加速器50において、主磁極1は、もう一つの主磁極1と対向する面の逆となる外周面1A側の面に窪み1Bを有しており、イオン源3のうち、放電室105および磁路103が、主磁極1を鉛直方向断面から見たときに主磁極1の外周面1Aより内側に配置、言い換えると主磁極1の窪み1Bの中に配置された。これにより、ビームラインを短縮することができ、大がかりな装置を用いることのない外部イオン源型の加速器とそれを備えた粒子線照射装置が提供される。

明 細 書

発明の名称： 加速器および粒子線照射装置

技術分野

[0001] 本発明は、陽子や炭素等のイオンを加速する加速器とそれを備えた粒子線照射装置に関する。

背景技術

[0002] サイクロトロン型加速器において外部に設置されたイオン源を用いることが特許文献1に記載されている。この特許文献1には、外部イオン源からサイクロトロンへイオンビームが入射するまでの機器構成が記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：米国特許第3794927号明細書

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 上述した特許文献1には、外部からイオンビームを入射する外部イオン源型入射システムを持つサイクロトロン型加速器が記載されている。しかし、この特許文献1に記載されたイオン源の配置ではビームライン上に多くのレンズ機構が必要である。このため、装置が複雑かつ大がかりとなる、との問題があった。

[0005] 本発明の目的は、ビームラインを短縮することができ、大がかりな装置を用いることのない外部イオン源型の加速器とそれを備えた粒子線照射装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0006] 上記課題を解決するために、例えば特許請求の範囲に記載の構成を採用する。

[0007] 本発明は、上記課題を解決する手段を複数含んでいるが、その一例を挙げるならば、少なくとも放電室、コイルおよび磁路を有するイオン源と、前記

イオン源から引き出されたイオンビームを加速する高周波加速電極と、前記イオンビームの周回軌道を発生させるように形成された、磁場を発生させる磁極と、を備え、前記イオン源のうち、前記放電室および前記磁路が、前記磁極を鉛直方向断面から見たときに前記磁極の外周面より内側に配置されたことを特徴とする。

[0008] また、他の一例をあげるならば、少なくとも放電室、コイルおよび磁路を有するイオン源と、前記イオン源から引き出されたイオンビームを加速する高周波加速電極と、対向するように設置され、磁場を間に形成する一对の磁極と、を備え、前記磁極は、もう一つの磁極と対向する面の逆の面に窪みを有しており、前記イオン源のうち前記放電室および前記磁路が前記磁極の前記窪みの中に配置されたことを特徴とする。

発明の効果

[0009] 本発明によれば、ビームラインを短縮することができ、大がかりな装置を用いることのない外部イオン源型の加速器とそれを備えた粒子線照射装置が提供される。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]本発明の実施例1の粒子線照射装置の全体構成を示す図である。
[図2]図1に示す加速器の側面断面を示す図である。
[図3]図1に示す加速器の横断面を示す図である。
[図4]実施例1の加速器のイオン源周りの側面の概略を示す図である。
[図5]実施例1におけるイオン源設置部の磁場解析結果を示す図である。
[図6]実施例1におけるイオン源設置部の中心位置における縦方向磁場の解析結果を示す図である。
[図7]本発明の実施例2の加速器の横断面を示す図である。
[図8]図7に示す加速器の側面断面を示す図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下に本発明の加速器および粒子線照射装置の実施例を、図面を用いて説明する。

[0012] <実施例 1 >

本発明の実施例 1 の加速器および粒子線照射装置を、図 1 乃至図 6 を用いて説明する。最初に、粒子線照射装置の全体構成および関連する装置の構成について図 1 を用いて説明する。図 1 は、本実施例の粒子線照射装置の全体構成を示す図である。

[0013] 図 1 において、粒子線照射装置 100 は、サイクロトロン型の加速器 50、ビーム輸送系 52、照射装置 54、治療台 40、および制御装置 56 を備える。

[0014] 粒子線照射装置 100 では、イオン源 3 で発生させたイオンを加速器 50 で加速してイオンビームとする。加速されたイオンビームは加速器 50 から出射され、ビーム輸送系 52 により照射装置 54 まで輸送される。輸送されたイオンビームは照射装置 54 で患部形状に合致するように整形され、治療台 40 に横になった患者 45 の標的に対して所定量照射される。

[0015] これら加速器 50 をはじめとした粒子線照射装置 100 内の各装置、機器の動作は、制御装置 56 によって制御される。

[0016] 次に加速器 50 の構造について図 2 乃至図 6 を用いて説明する。図 2 は本実施例の加速器の側面の断面図で、図 3 は横断面図である。

[0017] 図 2 および図 3 に示すように、サイクロトロン型の加速器 50 は、主磁極 1、円環状コイル 2、真空容器 6、高周波加速電極 7、イオン源 3、ビーム引き出し集束部 4、インフレクター 5 によって構成される。

[0018] 主磁極 1 は、対向するように設置された一对の磁性体であり、例えば鉄などからなる。主磁極 1 には、ビームの周回軌道 9 を発生させるように向かい合う磁極間に凸磁極 10 が設けられており、等時性磁場をその間に発生させる。凸磁極 10 によって磁場 B0 を発生させるとともに、周回するイオンビームの集束力を増加させ、安定周回に寄与する。磁場 B0 が発生する磁極ギャップ間の対向する上下面は対称形状である。

[0019] 真空容器 6 は主磁極 1 によって挟まれており、全体としてひとつの真空容器を形成するとともに磁気回路を構成する。真空容器 6 は非磁性体である。

- [0020] 円環状コイル 2 は真空容器 6 より大気側に設置されており、上下一対の主磁極 1 間に磁場を発生させる。円環状コイル 2 は常電導材料によるコイルでも超電導材料によるコイルでも同様に磁場を発生可能である。なお、円環状コイル 2 は真空容器 6 内に設置してもよく、特に規定されるものではない。
- [0021] 図 2 および図 3 に示すように、主磁極 1 のもう一つの主磁極 1 と対向する面とは逆の外周面 1 A 側に窪み 1 B が形成されており、イオン源 3 およびビーム引き出し集束部 4 がその窪み 1 B の中側に配置されている。すなわち、イオン源 3 を構成する主な構成要素やビーム引き出し集束部 4 が、主磁極 1 を鉛直方向断面から見たときに外周面 1 A より主磁極 1 の内側であり、かつ凸磁極 1 O より外側に配置されている。ビーム引き出し集束部 4 によって生成されたイオンをイオン源 3 から引き出している。イオン源 3 やビーム引き出し集束部 4 の詳細については後述する。
- [0022] イオン源 3 及びビーム引き出し集束部 4 は、できるだけ周回軌道 9 に近い位置に配置することでビームの発散を抑えることができるため、そのほかにビームを整形する手段が不要となり、構成機器を低減することができる。
- [0023] なお、イオン源 3 より引き出された直後のイオンビームは発散ビームとなるが、ビーム引き出し集束部 4 のビーム引き出し部 1 2 0 (図 4 参照) からインフレクター 5 までの鉛直方向距離 (主に凸磁極 1 O のギャップ) に応じて一組の集束レンズ 2 0 0 (図 4 参照) を配置する。このビーム引き出し集束部 4 のうち集束レンズ 2 0 0 については、ビーム引き出し部 1 2 0 (図 4 参照) からインフレクター 5 までの鉛直方向距離が十分に小さいときは設ける必要はなく、設ける場合も一つあれば十分であることが多いが、2 つ以上設けることもできる。
- [0024] なお、イオン源 3 及びビーム引き出し集束部 4 は、下側の主磁極 1 に設けられた窪みの主磁極 1 の内周面側に収まるように配置することもできる。
- [0025] ビーム引き出し集束部 4 によって引き出されたイオンビームは周回軌道 9 の中心に配置したインフレクター 5 により垂直から水平方向に偏向される。インフレクター 5 は主磁場 B_0 を乱さないように電場を用いてイオンビーム

を偏向する機器である。

[0026] インフレクター5によって水平方向に偏向されたイオンビームは、高周波加速電極7によって加速され、凸磁極10の磁場および高周波加速電極7の電場の作用によって螺旋状の周回軌道9を描きながら加速され、十分に加速された後で周回軌道9から引き出されて外部へ出力される。

[0027] 次に図4～図6を用いて、イオン源3及びビーム引き出し集束部4の詳細を説明する。図4は図2のイオン源3及びビーム引き出し集束部4の詳細を示した図である。

[0028] 図4に示すように、イオン源3はプラズマ生成にマイクロ波130を利用したマイクロ波イオン源であり、導波管101、磁路103、コイル102、放電室105、導入窓109、引き出し電極110、フランジ111、絶縁物104で構成される。イオン源3は、上述のように主磁極1の外周面1A側に形成された窪み1Bの中側に配置されている。

[0029] なお、イオン源3のうち、放電室105と、磁路103のうち放電室105をシールドする部分が、主磁極1の内部に配置されていればよく、イオン源3を構成するその他の構成については必ずしも主磁極1の内部に配置される必要はないが、その他の構成についても主磁極1の内部に配置されることが望ましい。

[0030] ビーム引き出し集束部4は、減速電極107、絶縁物106、接地電極108で構成されたビーム引き出し部120と、レンズ電極201および出口孔202で構成された集束レンズ200と、から構成される。

[0031] イオン源3では、導波管101から導入窓109を通してマイクロ波130を真空となる放電室105に導入するとともに、ガス供給源（図示省略）から原料ガスを導入して、導入したガスをマイクロ波電場とコイル102による磁場によってイオン化させることでプラズマを生成する。

[0032] 導波管101はマイクロ波発信源（図示省略）から供給されるマイクロ波をイオン源3の内部に供給する管であり、鉄製である。なお導波管101はアルミニウムや銅であってもよいが、主磁極1の内部に配置されたイオン源

3に接続されるため、鉄製が好適である。

[0033] マイクロ波130の周波数は例えば2.45ギガヘルツ（GHz）などである。

[0034] 導入窓109はマイクロ波130の反射が小さくなるように低誘電率の絶縁材料からなり、例えば石英やボロンナイトライド（BN）、窒化アルミなどでの材質である。

[0035] 放電室105は非磁性体の金属性の材料からなり、その内周側が真空となってプラズマが生成される箇所となる。

[0036] コイル102は放電室105の周囲に配置されており、そのコイル102を囲むように磁路103が形成されている。

[0037] 磁路103は放電室105を覆うような形状をした磁性体であり、例えば鉄などからなる。この磁路103により、主磁極1から漏洩する磁場が放電室105に影響することを防止する。

[0038] コイル102は独立に調整可能とし、放電室105内に発生する磁場を調整する。図4ではコイル102を2個使用しているが、1個あるいは3個でも磁場の発生は可能である。1個の場合は磁路103の形状を適切に形成することで放電室105内の磁場分布を調整可能である。このコイル102は永久磁石に置き換えることが可能である。

[0039] 図5は主磁極1にイオン源3設置用の空間を設け、そこに磁路103とコイル102を設置したときの2次元磁場解析結果である。主磁極1の磁極間ギャップには約1.3テスラ（T）の磁場が発生するように円環状コイル2の電流値を決定して解析した。

[0040] この図5に示すように、主磁極1から漏洩する磁場は磁路103に流れ込むため、放電室105内への漏洩磁場の影響を低下できることが分かった。このため、コイル102によって生成される磁場が放電室105側に十分に形成されることが分かった。また、主磁極1から漏洩する磁場は導波管101にも流れ込むことから、導波管101の材質を適宜選択することによって放電室105内への漏洩磁場の影響をより低下できることも分かった。

- [0041] 図6に、図5に示す中心部160位置での磁場分布を示す。横軸が中心部160の縦位置を示し、縦軸がその位置での縦方向磁場強度を示す。
- [0042] 図6に示すように、イオン源3が主磁極1に配置されていない場合150は、数百ガウスの漏れ磁場がある。これに対し、磁路103を有するイオン源3がある場合151では、放電室105内の磁場が0に近くなる。さらに磁路103を有するイオン源3においてコイル102によりプラズマ生成用の磁場を発生させた場合152では、プラズマ生成に必要なサイクロトロン共鳴磁場強度0.0875テスラ以上の傾斜を持った磁場が形成できることが分かる。
- [0043] 図4に戻って、絶縁物104は、イオン源3中の導波管101、磁路103、コイル102、放電室105、導入窓109、引き出し電極110を絶縁支持する。絶縁物104は絶縁性の材料であれば特に限定されない。
- [0044] 引き出し電極110は放電室105の下部に配置された電極であり、磁性体である。引き出し電極110を磁性体にする事で、容易に放電室105内の磁場分布をプラズマ生成に有効な分布とすることができる。
- [0045] イオン源3のフランジ111には引き出し電源300により正の電圧、例えば30~60キロボルト(kV)を印加し、減速電極107には減速電源301により負の電圧、例えば-2~-10キロボルト(kV)を印加する。引き出し電源300および減速電源301によって発生する引き出し電極110と減速電極107間の電場によって、放電室105内に生成したプラズマからイオンビームを引き出す。
- [0046] 減速電極107は絶縁物104によって絶縁支持された磁路103、コイル102、放電室105等の下方に配置されており、減速電極107等は絶縁物106によって接地電極108に固定され、さらに主磁極1に固定されている。
- [0047] 接地電極108には、ビーム引き出し方向にレンズ電極201、出口孔202で構成される集束レンズ(ビーム集束部)200を取り付ける。集束レンズ200は、イオン源3より引き出されたイオンビームを集束させる。こ

の集束レンズ200と接地電極108と減速電極107等とを一体構造としてビーム引き出し集束部4を形成する。

[0048] レンズ電極201にはレンズ電源302によって電圧を印加する。電圧は引き出し電源300の電圧を超えない正の値である。レンズ電極201はビーム引き出し方向に複数個設置して、それぞれ独立した電圧を印加することで、さらにビームを自由に整形可能となる。電圧は独立した電源で印加しても、抵抗分割などにより1台の電源で印加してもかまわない。

[0049] イオン源3から引き出されたイオンビームは、レンズ電極201を有する集束レンズ200で集束されて出口孔202から取り出された後、インフレクター5によってビームを主磁極1の対抗する凸磁極10の間のギャップへ導入される。

[0050] 一体化したビーム引き出し集束部4をイオン源3の直後に取り付けることによって、イオン源3から引き出されたイオンビームが発散する前にビームを集束させることができるので、レンズ電源302の電圧を低く抑えることができ、電源の容量低減にもつながる。

[0051] 次に、本実施例の効果について説明する。

[0052] 上述した本発明の実施例1の粒子線照射装置100は、加速器50と、加速器50から出射されたイオンビームを照射する照射装置54と、を備えている。このうち、加速器50は、少なくとも放電室105、コイル102および磁路103を有するイオン源3と、イオン源3から引き出されたイオンビームを加速する高周波加速電極7と、ビームの周回軌道9を発生させるように対向して設置された一对の主磁極1と、を備えている。このような加速器50において、主磁極1は、もう一つの主磁極1と対向する面の逆となる外周面1A側の面に窪み1Bを有しており、イオン源3のうち放電室105および磁路103が、主磁極1を鉛直方向断面から見たときに主磁極1の外周面1Aより内側に配置、すなわち主磁極1の窪み1Bの中に配置されている。

[0053] このような構成によって、外部イオン源型のイオン源3を備えたサイクロ

トロン型の加速器50において、主磁極1の外周面1Aより内部側の窪み1B内にイオン源3の主な構成が配置されるため、外部イオン源型でありながら、特許文献1に記載のような従来の外部イオン源型に比べてイオン源3からの引き出し後のビームラインを大幅に短縮することができるため、複雑かつ大がかりな装置を用いることなく、構成機器数を低減することが可能な小型の加速器を提供することができる。また、外部イオン源型であるため、メンテナンスや交換などの際のアクセスも容易である、との効果も得られるものとなっている。

[0054] また、イオン源3が磁路103を有するものとし、また放電室105と磁路103とが主磁極1の外周面1Aより内部側の窪み1B内に配置されたため、主磁極1内にイオン源3を設置した場合でも主磁極1の漏洩磁場の影響を遮断することができる。よって、単にイオン源を主磁極1の外周面1Aより内部側に配置するだけではイオンの生成が十分にできない、という本発明者の検討によって判明した問題が生じることも防止されている。

[0055] また、主磁極1は、凸磁極10を有しており、イオン源3のうち放電室105および磁路103が、凸磁極10より外側に配置されたため、交換などのメンテナンスの際にアクセスが困難な内部イオン源型に近い配置とならずに、アクセスが容易な外部イオン源型のイオン源の配置となり、ビームラインの短縮を図りつつ、メンテナンスが容易である、との効果をより確実に得ることができる。

[0056] 更に、イオン源3より引き出されたイオンビームを集束させる集束レンズ200を少なくとも一つ以上備えたことで、イオン源3からのビーム引き出し後にビームが発散したとしてもビームを集束させることができる。

[0057] また、イオン源3は、マイクロ波イオン源であることにより、長寿命のイオン源とすることができ、交換頻度の低減などのメンテナンス性の更なる向上を図ることができる。

[0058] 更に、イオン源3に接続された導波管101を更に有し、導波管101が鉄製であることで、コイル102で発生させた磁場を放電室105により集

中させることができるとともに、主磁極 1 からの漏洩磁場が放電室 105 内部に入り込むことをより抑制することができ、イオン源 3 におけるイオン生成効率の向上を図ることができる。

[0059] なお、加速器 50 として、上述のような等時性磁場を用いるサイクロトロン型の加速器の代わりに、等時性磁場ではない磁場を用いるシンクロサイクロトロン型の加速器を用いることができる。

[0060] シンクロサイクロトロン型の加速器とは、サイクロトロンを改良した加速器の一種であり、大型磁極間で円運動する荷電粒子に高周波電場を加えて繰返し加速する。また、高速では加速された粒子の質量が相対論的效果によって増加し、磁場内の荷電粒子の円運動の周期は質量に比例して増加する。これによって起こる高周波電圧との周期のずれを、周波数を変調することによって取り除いている。

[0061] シンクロサイクロトロン型の加速器も構成がサイクロトロン型の加速器と同様の構成であることからイオン源 3 やビーム引き出し集束部 4 を主磁極 1 内に配置することができ、同様の効果が得られる。

[0062] <実施例 2>

本発明の実施例 2 の加速器および粒子線照射装置を図 7 および図 8 を用いて説明する。

[0063] 本実施例の粒子線治療装置は、加速器の構造が異なる以外は実施例 1 の粒子線治療装置と同じ構造であるため、加速器以外の説明は省略する。本実施例の粒子線装置に設けられた加速器 90 の構造について図 7 および図 8 を用いて説明する。図 7 は加速器の横断面を示す図、図 8 は図 7 の A-A 断面を示す図である。

[0064] 図 7 および図 8 に示すように、本実施例の加速器 90 は、イオン源 73 と、高周波加速電極 77 と、主磁極 71 と、局所磁場発生部 83 と、真空容器 76 と、円環状コイル 72 と、取り出しセプタム 81 とを備えている。

[0065] 真空容器 76 の内部には、内部が中空となる高周波加速電極 77 が凹磁極 80c の部分に左右対称に配置されており、高周波電源により外部から高周

波を加えるようになっている。この高周波により発生した電場を用いて高周波加速電極 77 はイオン源 73 から引き出されたイオンビームを加速する。

[0066] 真空容器 76 は主磁極 71 によって挟まれるように配置されており、全体としてひとつの真空容器を形成するとともに、磁気回路を構成することで磁極ギャップに主磁場 B_0 を発生させる。真空容器 76 は非磁性体である。

[0067] 円環状コイル 72 は真空容器 76 の大気側に設置されており、主磁極 71 によって主磁極 71 間の磁極ギャップに主磁場 B_0 を発生させるためのコイルである。円環状コイル 72 は常電導材料によるコイルでも超電導材料によるコイルでも構わない。

[0068] 主磁極 71 は、図 7 に示すように、凸磁極 $80a_1$, $80a_2$, $80b_1$, $80b_2$ および凹磁極 $80c$ を有しており、上面から見たときに、凸磁極 $80a_1$ と凸磁極 $80a_2$ とが左右対称、凸磁極 $80b_1$ と凸磁極 $80b_2$ とが左右対称の構造となっている。これに対し、凸磁極 $80a_1$ と凸磁極 $80b_1$ とが上下非対称、凸磁極 $80a_2$ と凸磁極 $80b_2$ とが上下非対称の構造となっている。イオンビームの周回周波数は例えば 19.82 メガヘルツ (MHz) など、主磁極 71 はどのエネルギーでも同一時間で 1 周する等時性磁場を発生させるように設定されている。例えば、ビームの軌道に沿ってビームに作用する磁場は、凸磁極 $80a_1$, $80a_2$, $80b_1$, $80b_2$ により凹部では低磁場、凸部では高磁場となるように形成されている。凸磁極 $80a_1$, $80a_2$, $80b_1$, $80b_2$ の形状および高さは、鉛直方向と周回方向のイオンビームの発散を抑えるような向き、強度に設定される。主磁極 71 は磁性体で、例えば鉄などである。主磁極 71 の磁極ギャップに対向する面は対称形状である。凸磁極 $80a_1$, $80a_2$, $80b_1$, $80b_2$ 、凹磁極 $80c$ で形成される磁極の中心は主磁極 71 中心からビームの取り出し位置 82 に偏った位置にあり、その近傍にイオン源 73 が配置されている。このような偏った配置構造により、主磁極 71 は周回軌道 79 中に軌道集約領域 78 を発生させる。

[0069] なお、本実施例では 4 個の凸磁極 $80a_1$, $80a_2$, $80b_1$, $80b_2$ を

使用しているが、2極以上であれば制限はない。また、図示していないが凸磁極 $80a_1$ 、 $80a_2$ 、 $80b_1$ 、 $80b_2$ には磁場の微調整用のトリムコイルを設け、等時性とベータatron振動の安定を確保するようにトリムコイル電流を調整することも可能である。

[0070] なお、本発明における「等時性磁場」とは、上述のように、加速されるイオンビームのエネルギーが増加してこのイオンビームが周回するビーム周回軌道の半径が大きくなってもイオンビームが一周する時間が変わらない磁場のことを意味する。

[0071] また、「周回軌道」とは、イオン源73から出射されたイオンが取り出し位置82から取り出されるまでの複数の環状の軌道のことを意味する。

[0072] イオン源73も、図8に示すように、主磁極71を鉛直方向断面から見たときに主磁極71の外周面71Aに形成された窪み71Bの中、かつ凸磁極 $80a_1$ 、 $80a_2$ 、 $80b_1$ 、 $80b_2$ より外側に配置されている。なお、イオン源73においても、放電室と、磁路のうち放電室をシールドする部分が、主磁極71の内部に配置されていればよく、その他の構成については必ずしも主磁極71の内部に配置される必要はない。

[0073] 上記により構成された加速器90は以下のように動作する。

[0074] ビーム引き出し集束部74によってイオン源73から引き出されたイオンビームは周回軌道79の中心に配置したインフレクター75により垂直から水平方向に偏向され、凸磁極 $80a_1$ 、 $80a_2$ 、 $80b_1$ 、 $80b_2$ 、凹磁極 $80c$ で形成された主磁場 B_0 により螺旋運動を行う。螺旋運動中に高周波加速電極77を通過するごとに高周波加速電極77で発生した電場によって加速され、エネルギーが増加し、回転半径を増加させて真空容器76内を周回運動する。この際、凸磁極 $80a_1$ 、 $80a_2$ 、 $80b_1$ 、 $80b_2$ の形状および高さは、鉛直方向と周回方向のビームの発散を抑えるような向き、強度に設定されており、またイオンビームがどのエネルギーでも同一時間で1周するように設定されている。また、ビームの軌道に沿ってビームに作用する磁場は凸磁極 $80a_1$ 、 $80a_2$ 、 $80b_1$ 、 $80b_2$ により凹部では低磁場、

凸部では高磁場となっている。このようにビーム軌道に沿って磁場の強弱をつけ、さらに軌道に沿った磁場の平均値をビームの相対論的ガンマ・ファクター（ γ ファクター）に比例させているため、周回ビームの周回時間をエネルギーに依らず一定としつつ、ビームの軌道面内と軌道面に対して垂直な方向で安定にベータトロン振動する。

[0075] 周回するビームは、取り出しエネルギーに達したところの局所磁場発生部 83 によって発生した局所磁場によって軌道が偏向される。これにより周回ビームは周回軌道から逸脱し、取り出し位置 82 へと移動し、取り出しセプタム 81 によって加速器 90 外へと導かれる。局所磁場の向きはエネルギーによって主磁場 B_0 と同方向・逆方向が決められる。周回するイオンビーム軌道が取り出し位置 82 で集約していることから、集約していない軌道に比べ少ない局所磁場で取り出し位置 82 に向けた偏向・取り出しが可能となる。

[0076] その他の構成・動作は前述した実施例 1 の加速器および粒子線照射装置と略同じ構成・動作であり、詳細は省略する。

[0077] 本発明の実施例 2 の加速器および粒子線照射装置においても、前述した実施例 1 の加速器および粒子線照射装置とほぼ同様な効果が得られる。

[0078] また、主磁極 71 は、周回軌道 79 中に軌道集約領域 78 を発生させるように形成されたことにより、周回するイオンビーム軌道が取り出し位置 82 で集約されていることから、集約していない軌道に比べて少ない局所磁場でビームの取り出し位置 82 まで偏向させることができ、取り出しが非常に容易となる。特に、軌道集約領域 78 ではビーム周回軌道相互の間隔は従来に比べて狭くなっているため、イオンビームのエネルギーが広範囲にわたっていても、局所磁場発生部 83 で発生させる磁場等を用いることにより所定のエネルギーのイオンビームを軌道集約領域 78 側のビームの取り出し位置 82 に向けて安定、かつ容易に偏向させることができる。

[0079] <その他>

なお、本発明は上記した実施例に限定されるものではなく、様々な変形例

が含まれる。例えば、上記した実施例は本発明をわかりやすく説明するために詳細に説明したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施例の構成の一部を他の実施例の構成に置き換えることが可能であり、また、ある実施例の構成に他の実施例の構成を加えることも可能である。また、各実施例の構成の一部について、他の構成の追加・削除・置換をすることが可能である。

[0080] 例えば、上述の実施例では、イオン源としてマイクロ波イオン源を用いる場合について説明したが、イオン源はマイクロ波イオン源に限られない。例えば、直流型や高周波型のイオン源であっても、放電室をシールドするように磁路が設けられているものであれば、本発明は適用することができる。

符号の説明

- [0081] 1, 7 1 …主磁極
1 A, 7 1 A …外周面
1 B, 7 1 B …窪み
2, 7 2 …円環状コイル
3, 7 3 …イオン源
4, 7 4 …ビーム引き出し集束部
5, 7 5 …インフレクター
6, 7 6 …真空容器
7, 7 7 …高周波加速電極
9, 7 9 …周回軌道
1 0, 8 0 a₁, 8 0 a₂, 8 0 b₁, 8 0 b₂ …凸磁極
4 0 …治療台
4 5 …患者
5 0, 9 0 …加速器
5 2 …ビーム輸送系
5 4 …照射装置
5 6 …制御装置

7 8 …軌道集約領域
8 0 c …凹磁極
8 1 …取り出しセプタム
8 2 …取り出し位置
8 3 …局所磁場発生部
1 0 0 …粒子線照射装置
1 0 1 …導波管
1 0 2 …コイル
1 0 3 …磁路
1 0 4 …絶縁物
1 0 5 …放電室
1 0 6 …絶縁物
1 0 7 …減速電極
1 0 8 …接地電極
1 0 9 …導入窓
1 1 0 …引き出し電極
1 1 1 …フランジ
1 2 0 …ビーム引き出し部
1 3 0 …マイクロ波
1 6 0 …中心部
2 0 0 …集束レンズ (ビーム集束部)
2 0 1 …レンズ電極
2 0 2 …出口孔
3 0 0 …引き出し電源
3 0 1 …減速電源
3 0 2 …レンズ電源

請求の範囲

- [請求項1] 少なくとも放電室、コイルおよび磁路を有するイオン源と、
前記イオン源から引き出されたイオンビームを加速する高周波加速
電極と、
前記イオンビームの周回軌道を発生させるように形成された、磁場
を発生させる磁極と、を備え、
前記イオン源のうち、前記放電室および前記磁路が、前記磁極を鉛
直方向断面から見たときに前記磁極の外周面より内側に配置された
ことを特徴とする加速器。
- [請求項2] 請求項1に記載の加速器において、
前記磁極は、磁極凸部を有しており、
前記イオン源のうち前記放電室および前記磁路が、前記磁極凸部よ
り外側に配置された
ことを特徴とする加速器。
- [請求項3] 請求項1に記載の加速器において、
更に、前記イオン源より引き出された前記イオンビームを集束させ
るビーム集束部を少なくとも一つ以上備えた
ことを特徴とする加速器。
- [請求項4] 請求項1項記載の加速器において、
前記磁極は、前記周回軌道中に軌道集約領域を発生させるように形
成された
ことを特徴とする加速器。
- [請求項5] 請求項1項記載の加速器において、
前記イオン源は、マイクロ波イオン源である
ことを特徴とする加速器。
- [請求項6] 請求項5に記載の加速器において、
前記イオン源に接続された導波管を更に有し、前記導波管が鉄製で
ある

ことを特徴とする加速器。

[請求項7]

請求項1項記載の加速器において、
前記加速器が、シンクロサイクロトロンである
ことを特徴とする加速器。

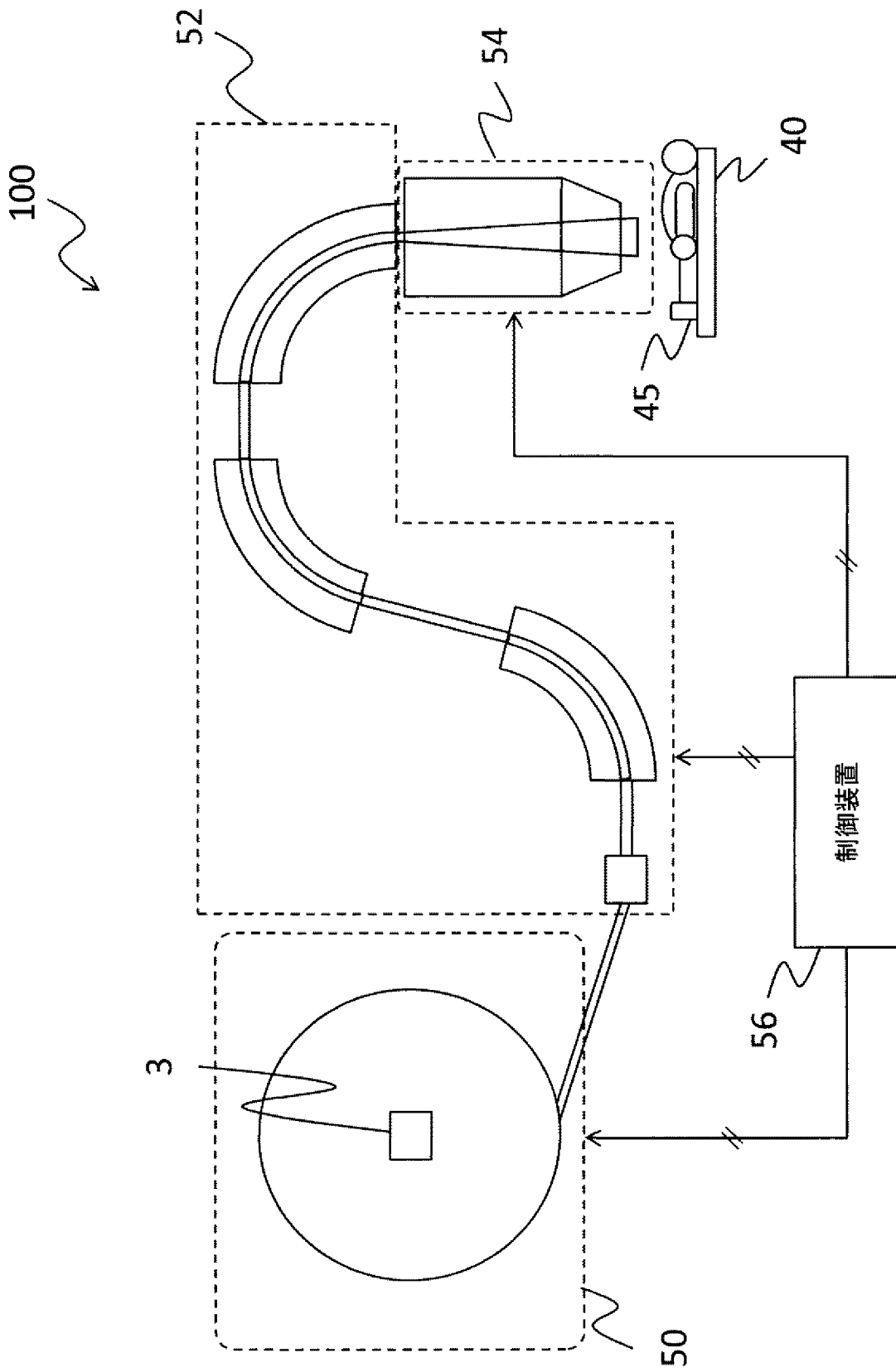
[請求項8]

請求項1に記載された加速器と、
前記加速器から出射された前記イオンビームを照射する照射装置と
、を備えた
ことを特徴とする粒子線照射装置。

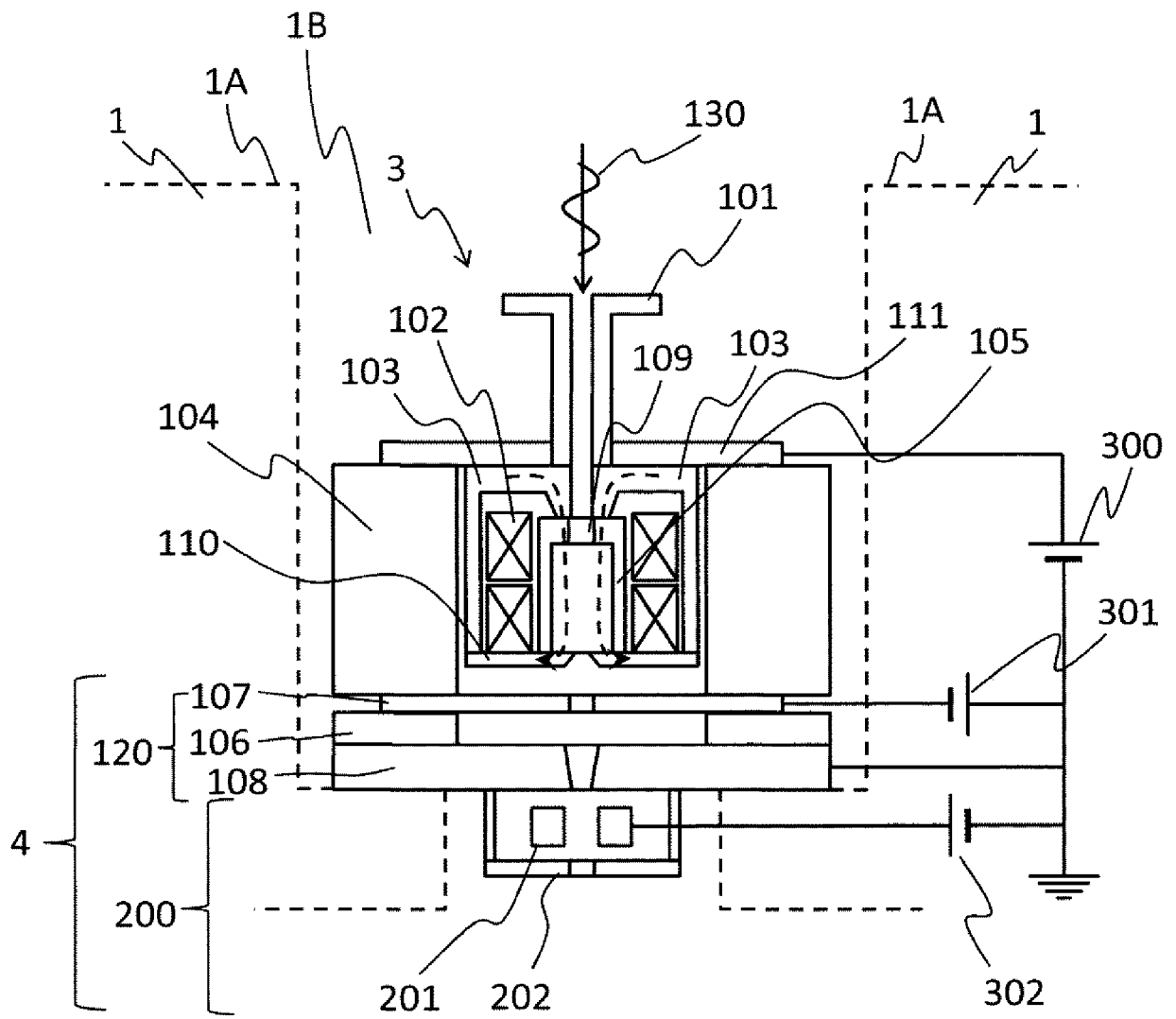
[請求項9]

少なくとも放電室、コイルおよび磁路を有するイオン源と、
前記イオン源から引き出されたイオンビームを加速する高周波加速
電極と、
対向するように設置され、磁場を間に形成する一对の磁極と、を備
え、
前記磁極は、もう一つの磁極と対向する面の逆の面に窪みを有して
おり、
前記イオン源のうち前記放電室および前記磁路が前記磁極の前記窪
みの中に配置された
ことを特徴とする加速器。

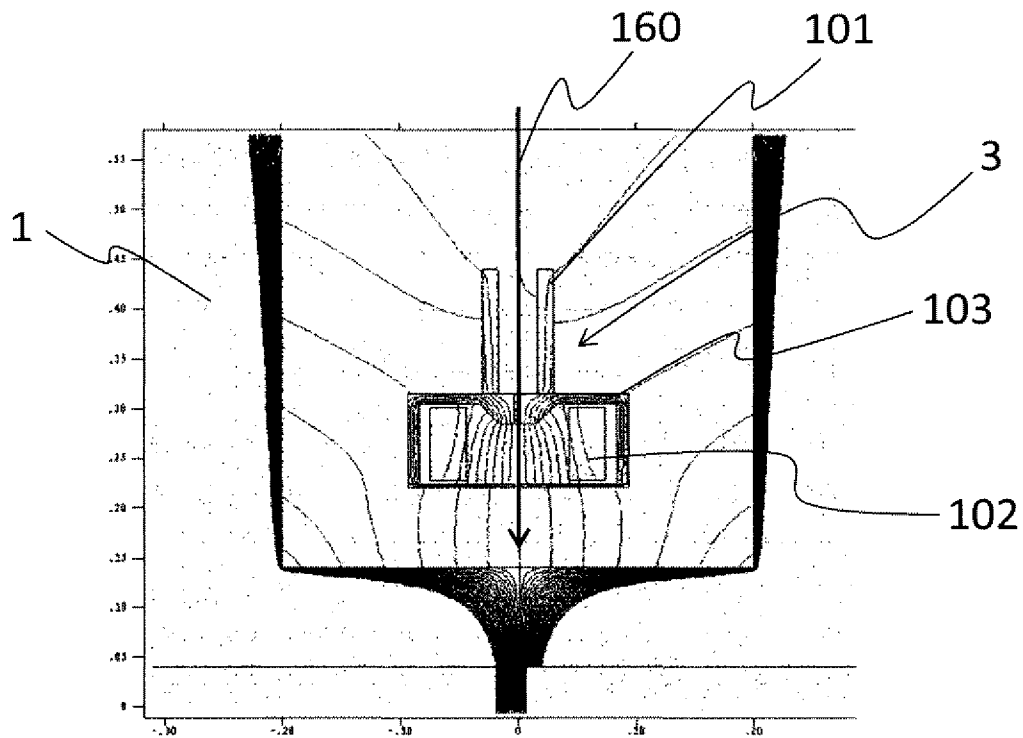
[図1]



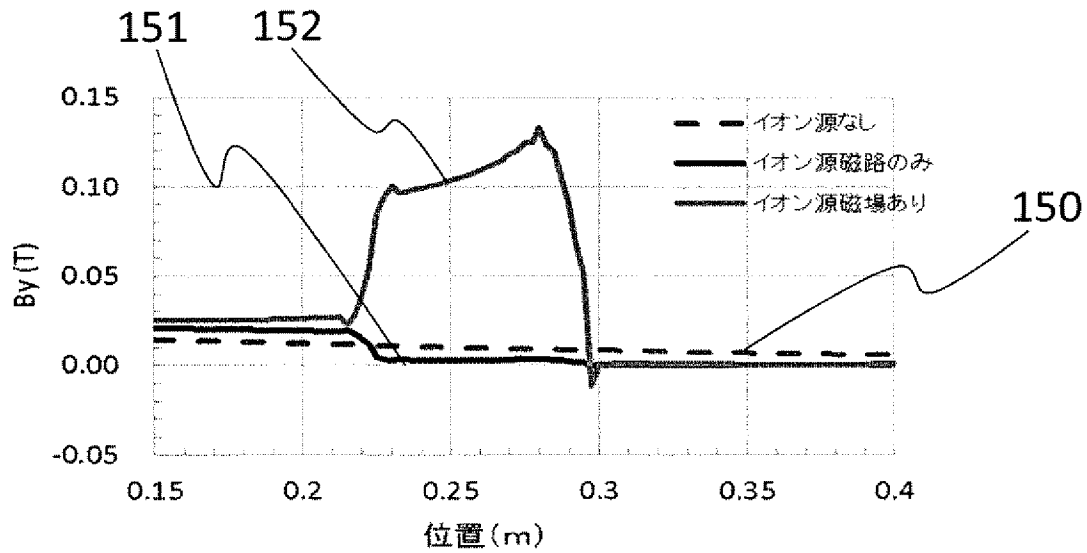
[図4]



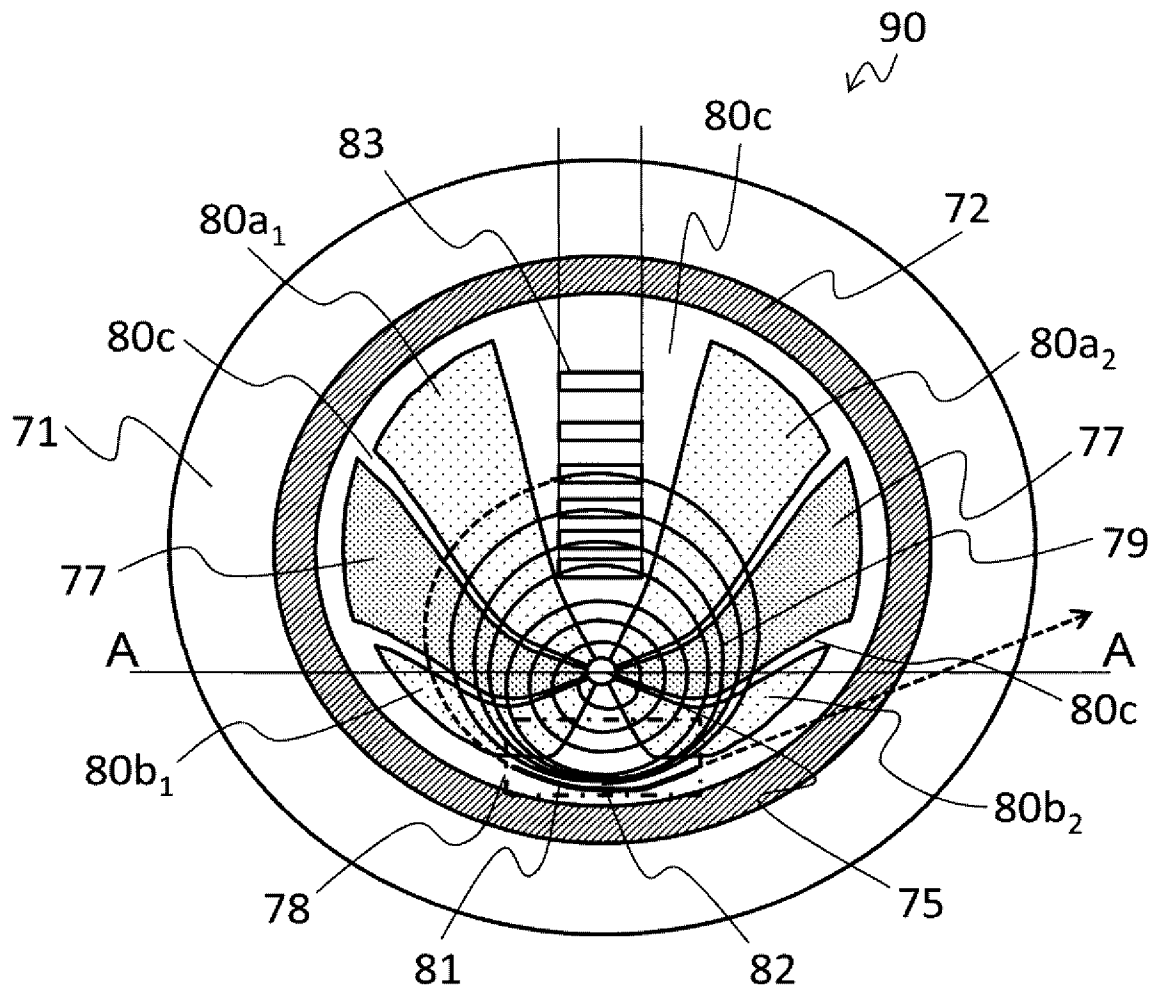
[図5]



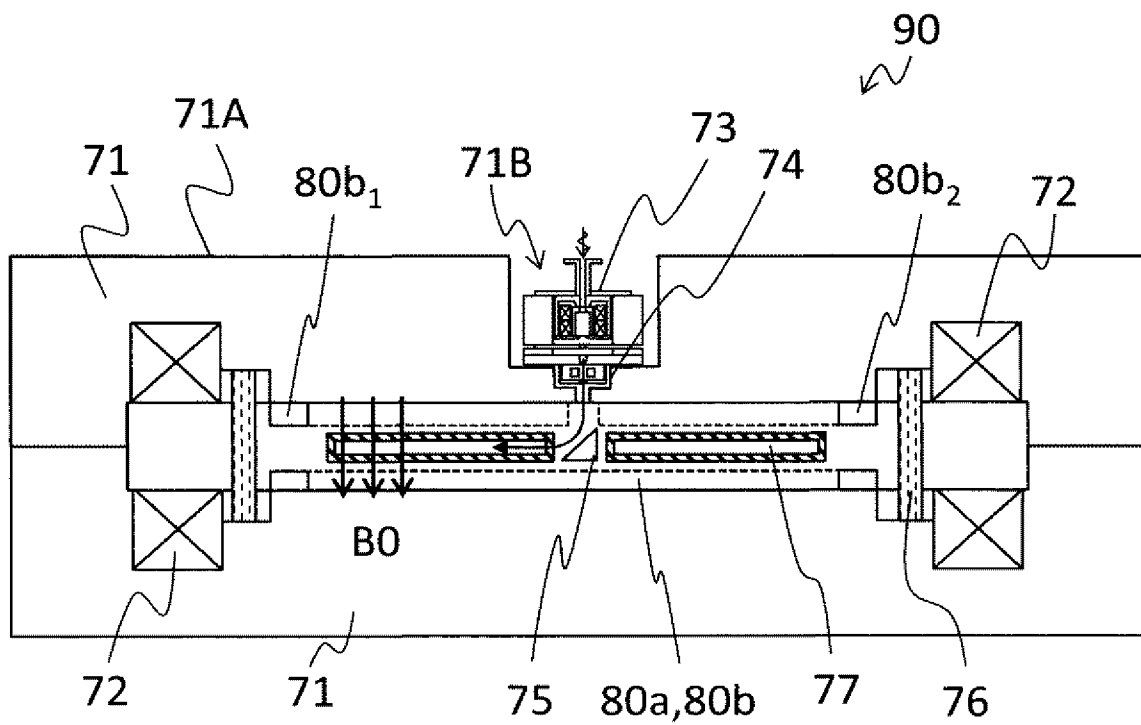
[図6]



[図7]



[図8]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2016/084969

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H05H7/08(2006.01)i, G21K5/04(2006.01)i, H05H13/02(2006.01)i, H05H13/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H05H7/08, G21K5/04, H05H13/02, H05H13/04

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	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2014-75322 A (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.), 24 April 2014 (24.04.2014), paragraphs [0016] to [0021]; fig. 1 (Family: none)	1, 3-8 2, 9
Y A	JP 2008-234880 A (Hitachi, Ltd.), 02 October 2008 (02.10.2008), paragraphs [0011] to [0014]; fig. 1 (Family: none)	1, 3-8 2, 9
Y A	JP 7-262945 A (Hitachi, Ltd.), 13 October 1995 (13.10.1995), paragraphs [0036] to [0039]; fig. 1 (Family: none)	1, 3-8 2, 9

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 10 January 2017 (10.01.17)	Date of mailing of the international search report 17 January 2017 (17.01.17)
---	--

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.
--	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/084969

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 2015-133241 A (Hitachi, Ltd.), 23 July 2015 (23.07.2015), paragraphs [0023] to [0035]; fig. 1 to 4 (Family: none)	4
Y	WO 2016/092623 A1 (Hitachi, Ltd.), 16 June 2016 (16.06.2016), paragraphs [0053] to [0211]; fig. 1 to 26 (Family: none)	4

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H05H7/08(2006.01)i, G21K5/04(2006.01)i, H05H13/02(2006.01)i, H05H13/04(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. H05H7/08, G21K5/04, H05H13/02, H05H13/04

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	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017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 2014-75322 A (住友重機械工業株式会社) 2014.04.24, 第【0016】-【0021】段落および第1図 (ファミリーなし)	1、3-8 2、9
Y A	JP 2008-234880 A (株式会社日立製作所) 2008.10.02, 第【0011】-【0014】段落および第1図 (ファミリーなし)	1、3-8 2、9

C欄の続きにも文献が列挙されている。

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

の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

10.01.2017

国際調査報告の発送日

17.01.2017

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)

藤本 加代子

電話番号 03-3581-1101 内線 3273

21

4458

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 A	JP 7-262945 A (株式会社日立製作所) 1995.10.13, 第【0036】－【0039】段落および第1図 (ファミリーなし)	1、3－8 2、9
Y	JP 2015-133241 A (株式会社日立製作所) 2015.07.23, 第【0023】－【0035】段落および第1－4図 (ファミリーなし)	4
Y	WO 2016/092623 A1 (株式会社日立製作所) 2016.06.16, 第【0053】－【0211】段落および第1－26 図 (ファミリーなし)	4