



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116803215 A

(43) 申请公布日 2023. 09. 22

(21) 申请号 202180091992.1

(22) 申请日 2021.12.23

(30) 优先权数据

2021-018465 2021.02.08 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.07.26

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2021/047985 2021.12.23

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/168484 JA 2022.08.11

(71) 申请人 株式会社日立制作所

地址 日本东京都

(72) 发明人 青木孝道 关孝义 中岛裕人

(74) 专利代理机构 北京银龙知识产权代理有限公司

11243

专利代理师 许静 范胜杰

(51) Int.Cl.

H05H 13/02 (2006.01)

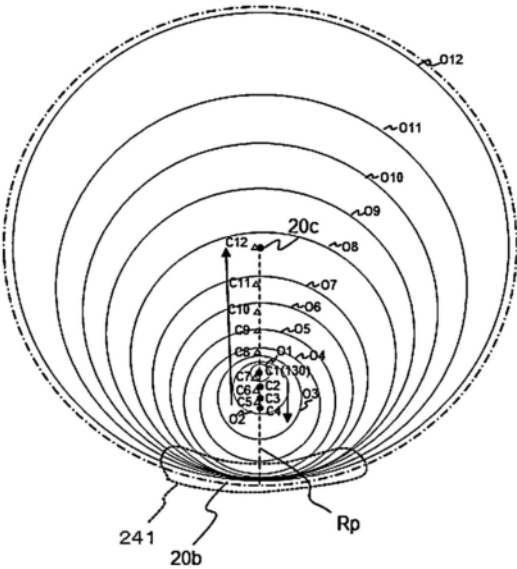
权利要求书2页 说明书15页 附图13页

(54) 发明名称

加速器以及粒子束治疗系统

(57) 摘要

随着离子束被加速,旋转轨道的半径逐渐变大,且旋转轨道的中心沿空隙的预定的半径方向向靠近周缘部的方向移动后,旋转轨道的移动方向反转并进一步向所述空隙的中心移动。为了实现这一点,设计主磁场的轨道面内的强度分布。由此,作为小型且能够变更取出射束的能量的加速器,提高从外部离子源向加速器内的射束入射的效率,其结果,提高所射出的离子束的剂量率。



1. 一种加速器,其特征在于,具有:

电磁铁,其包括隔着使离子束旋转的轨道面对置的一对磁极,并形成在所述轨道面产生多个旋转轨道的主磁场;

离子入射用贯通孔,其为了从外部将离子束导入到所述轨道面的预定的入射位置而形成于所述磁极;

高频加速空腔,其被插入到在所述一对磁极间形成的空隙中,产生对绕所述轨道面旋转的离子束进行加速的高频;以及

附加磁场产生部和取出通道,所述附加磁场产生部配置于所述空隙的外周,对在最外周和最外周的内侧的一个以上的所述旋转轨道上移动中的离子束施加磁场而使移动方向偏离所述旋转轨道,所述取出通道将偏离所述旋转轨道的离子束向所述空隙外引导,

所述主磁场的所述轨道面内的强度分布被设计成随着所述离子束被加速,所述旋转轨道的半径逐渐变大,且在其中心沿着所述空隙的预定的半径方向向靠近周缘部的方向移动之后,使移动方向反转,进一步朝向所述空隙的中心移动。

2. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

所述电磁铁的所述主磁场的所述强度分布被设计为,所述旋转轨道的中心沿着所述空隙的所述预定的半径方向向接近所述空隙的周缘部的方向移动,直至其半径达到预先决定的第一半径为止,在达到所述第一半径之后,沿着所述半径方向向所述空隙的中心移动。

3. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

所述一对磁极分别为圆筒形,具有以隔着所述轨道面对称的方式配置的磁极面,

所述离子入射用贯通孔设置于中心轴与所述轨道面垂直且与所述预定的半径方向正交的位置。

4. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

所述离子入射用贯通孔的中心轴与所述空隙的中心的距离被设定在所述空隙的半径的长度的50%以内。

5. 根据权利要求3所述的加速器,其特征在于,

在所述磁极面,在所述离子入射用贯通孔与所述磁极的中心之间且与所述离子入射用贯通孔相邻的位置配置有垫片。

6. 根据权利要求5所述的加速器,其特征在于,

所述离子入射用贯通孔和所述垫片分别设置于在相对的所述磁极上隔着所述轨道面而对称的位置,

所述一对垫片间的距离比所述离子入射用贯通孔与所述磁极面的外周之间的沿着所述预定的半径方向的位置且与所述离子入射用贯通孔相邻的位置的所述一对磁极面间的距离、或者配置于该位置的垫片的距离窄。

7. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

在所述电磁铁的外侧设置有向所述离子入射用贯通孔入射离子束的离子源。

8. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

所述取出通道配置于所述空隙的所述预定的半径方向的外周部。

9. 根据权利要求5所述的加速器,其特征在于,

在所述离子入射用贯通孔与所述磁极的中心之间且沿着所述半径方向的各位置的磁

场梯度中,配置有所述垫片的位置的磁场梯度最大。

10. 根据权利要求9所述的加速器,其特征在于,

在所述离子入射用贯通孔与所述空隙的外周之间,沿着所述半径方向的各位置的磁场梯度在所述空隙的周缘部最大。

11. 根据权利要求3所述的加速器,其特征在于,

在所述磁极面具备多个环状的微调线圈,所述微调线圈设置于所述轨道面的与多个所述旋转轨道对应的半径且与所述旋转轨道对应的位置的磁极面。

12. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

所述高频加速空腔包括D形电极,所述D形电极的边缘以与所述轨道面平行地横穿所述空隙的方式配置,所述边缘的形状为以所述入射位置的附近为中心的W字型。

13. 一种粒子束治疗系统,其向患者照射粒子束射束,其特征在于,

作为所述粒子束射束的产生装置,使用权利要求1至12中的任一项所述的加速器。

加速器以及粒子束治疗系统

技术领域

[0001] 本发明涉及对质子或碳离子等重离子进行加速的加速器和粒子束治疗系统以及加速器的运转方法。

背景技术

[0002] 使用加速器来生成粒子束治疗、物理实验等中使用的高能量的离子束。

[0003] 粒子束治疗能够根据其粒子束的种类进行分类,有对患部照射质子束的质子束治疗和照射碳、氦等比质子重的原子核的重粒子束治疗。在质子束治疗中需要230MeV左右的每个核子的动能,在碳束的情况下需要430MeV左右的每个核子的动能。能够生成这些射束的加速器有几个种类。例如,已知有回旋加速器、同步加速器、专利文献1所记载的同步回旋加速器、专利文献2所记载的可变能量加速器。

[0004] 回旋加速器及同步回旋加速器的特征在于,通过高频电场对在静磁场中旋转的射束进行加速,射束随着加速而增加其轨道的曲率半径,向外侧的轨道移动,达到最高能量之后被取出。因此,取出的射束的能量基本上被固定。

[0005] 另一方面,同步加速器通过使射束偏转的电磁铁的磁场和加速的高频电场的频率随时间变化,射束在固定的轨道上环绕。因此,能够在达到设计上的最大能量之前取出射束,能够控制取出能量。

[0006] 在专利文献1的同步回旋加速器中,具有半径R的大致圆形的截面的一对铁磁性体的磁极使中心轴一致,隔着正中面而上下配置。一对磁极被间隙(gap)隔离,该间隙形成具有相对于正中面实质上对称的轮廓(profile)的空隙(cavity)。间隙的高度在磁极的半径方向上变化。间隙的高度在中心轴为 H_{center} ,在从中心轴到半径R2的圆形的部分,随着半径变大而从 H_{center} 逐渐增大,在半径R2处成为最大值 H_{max} 。大于半径R2的环状部分随着半径变大,其间隙的高度逐渐减小,磁极边缘的间隙高度为 H_{edge} 。专利文献1中公开了具备这种间隙形状的空隙的同步回旋加速器能够使间隙内的磁场最小化,另一方面能够使同步回旋加速器的尺寸最小化。

[0007] 另一方面,在专利文献2中公开了能够射出能量不同的离子束的可变能量加速器。该加速器具备使离子束旋转的外周形成圆形的空隙(空间)的电磁铁。离子源向从圆形的空隙的中心轴向半径方向大幅偏离的接近外周的预定位置入射离子束。对入射的离子束照射高频,一边加速一边在空隙内旋转。低速的离子束在轨道半径小的轨道旋转,以轨道半径随着加速而逐渐变大的方式设计电磁铁的主磁场的磁场分布。

[0008] 此时,在专利文献2的加速器中,以随着轨道半径变大而轨道的中心逐渐朝向圆形的空隙的中心轴移动的方式设计电磁铁的主磁场分布。由此,如专利文献2的图5所公开的那样,能够使所有轨道密集地穿过离子的入射位置与空隙的外周之间的狭窄区域。因此,通过在空隙的最外周配置磁场产生部,不仅对于最外周,对于其内侧的1个以上的轨道,也能够施加绕该轨道旋转的离子偏离轨道的方向的力。由此,能够使离子束产生远离旋转轨道的方向的波动,并进入向空隙外射出的射出轨道而向加速器外部射出。

[0009] 这样,专利文献2的加速器不仅能够使最外周轨道的能量的离子束射出,还能够使其内侧的多个轨道的能量的离子束射出,因此能够使射出的离子束的能量变化。

[0010] 现有技术文献

[0011] 专利文献

[0012] 专利文献1:日本特表2013-541170号公报

[0013] 专利文献2:日本特开2019-96405号公报

发明内容

[0014] 发明所要解决的课题

[0015] 专利文献1中记载的同步回旋加速器是通过高频电场对在主磁场中旋转的射束进行加速的类型的加速器。在这种同步回旋加速器中,具有射束的旋转频率随着射束的能量增加而降低的特性,需要与射束的旋转频率同步地调制高频电场的频率。因此,入射低能量的射束后加速取出,进而再次入射射束为止成为一个运转周期。同步回旋加速器的运转周期由激发高频电场的空腔的谐振频率的扫描速度决定,一般为数毫秒左右。取出在该数毫秒的运转周期中以1次的比例旋转的射束的总量。并且,所取出的射束的能量基本上被固定。

[0016] 在粒子束治疗中,要求不超过在治疗计划等中预先决定的照射剂量的允许范围地对照射对象的肿瘤照射射束。在同步回旋加速器中,在每个运转周期取出射束的总量,因此在使用同步回旋加速器的粒子束治疗系统中,需要将在同步回旋加速器的一个运转周期内能够加速/取出的射束量设定为相对于照射剂量的允许范围足够小。因此,存在如下课题:不得不使在一个运转周期加速的电荷量小于由加速器的性能决定的上限,照射完成花费时间。

[0017] 并且,以往的回旋加速器中,为了使射束的旋转频率不依赖于能量而固定,需要等时性磁场的励磁,尤其难以将等时性磁场激发至碳射线治疗中所使用的能量区域而使射束加速。进而,回旋加速器无法变更取出射束的能量。另一方面,同步加速器虽然取出射束的能量可变,但现状是存在轨道的周长为50m以上这样的大型化的课题。

[0018] 另一方面,专利文献2的加速器不仅能够使最外周的能量的离子束射出,还能够使最外周的内侧的1个以上的轨道的能量的离子束射出,但由于在空隙的外周部形成轨道密集的区域,因此从离子源入射离子束的位置成为靠近空隙的外周的位置。如专利文献2的图2所示,离子源搭载于电磁铁的上表面,在电磁铁的磁极等设置有射束入射用贯通孔115,离子束从离子源穿过射束入射用贯通孔115内而入射至空隙内。射束入射用贯通孔115以贯通靠近空隙的外周的位置、即靠近磁极的外周的位置的方式设置,成为横穿过磁极的磁力线的配置。因此,对在射束入射用贯通孔115的内部行进的离子束施加磁极内的磁力线的磁场,产生洛伦兹力而进行漂移运动。为了避免这种情况,例如需要如下结构:在射束入射用贯通孔115的附近配置一对电极,对离子束施加电场,使洛伦兹力与从电场受到的力平衡,使离子束在射束入射用贯通孔115内笔直地前进等。因此,专利文献2的加速器中,从离子源向空隙内的离子束的入射效率受到能够施加于离子入射用贯通孔的电压的大小的影响。

[0019] 本发明的目的在于,在小型且能够变更取出射束的能量的加速器中,提高从外部离子源向加速器内的射束入射的效率,结果提高所射出的离子束的剂量率。

[0020] 用于解决课题的手段

[0021] 为了实现上述目的,本发明的加速器具有:电磁铁,其包括隔着使离子束旋转的轨道面对置的一对磁极,并形成在轨道面产生多个旋转轨道的主磁场;离子入射用贯通孔,其为了从外部将离子束导入到轨道面的预定的入射位置而形成于磁极;高频加速空腔,其被插入到在一对磁极间形成的空隙中,产生对绕轨道面旋转的离子束进行加速的高频;以及附加磁场产生部和取出通道,附加磁场产生部配置于空隙的外周,对在最外周和最外周内侧的一个以上的旋转轨道上移动中的离子束施加磁场而使移动方向偏离旋转轨道,取出通道将偏离旋转轨道的离子束向空隙外引导。主磁场的轨道面内的强度分布被设计成随着离子束被加速,旋转轨道的半径逐渐变大,且其中心沿着空隙的预定的半径方向向靠近周缘部的方向移动之后,使移动方向反转,进一步朝向空隙的中心移动。

[0022] 发明效果

[0023] 根据本发明,能够增加来自小型且可变更取出射束的能量的加速器的射束照射量,并实现粒子束治疗系统中的剂量率的提高。

附图说明

[0024] 图1是表示本发明的第一实施方式的加速器的整体概略形状的立体图。

[0025] 图2是第一实施方式的加速器的纵截面图。

[0026] 图3是第一实施方式的加速器的横截面图。

[0027] 图4是表示本发明的第一实施方式的加速器中的射束的旋转轨道和等旋转相位线的图。

[0028] 图5是说明本发明的第一实施方式的加速器中的代表性的旋转轨道及其中心的移动方向的图。

[0029] 图6是本发明的第一实施方式的加速器的控制框图。

[0030] 图7是表示本发明的第一实施方式的加速器中的主磁场强度的射束旋转轨道能量依赖性的图。

[0031] 图8是表示本发明的第一实施方式的加速器中的射束的旋转频率的射束旋转轨道能量依赖性的图。

[0032] 图9是本发明的第一实施方式的加速器中的运转的时序图。

[0033] 图10是本发明的第一实施方式的加速器中的运转控制的流程图。

[0034] 图11是本发明的第二实施方式的粒子束治疗系统的结构图。

[0035] 图12是比较例的加速器的纵截面图。

[0036] 图13是表示比较例的加速器中的射束的旋转轨道和等旋转相位线的图。

[0037] 图14是说明比较例的加速器中的代表性的旋转轨道及其中心的移动方向的图。

具体实施方式

[0038] 以下,使用附图对本发明的加速器和粒子束治疗系统的一实施方式进行说明。

[0039] 《第一实施方式》

[0040] 作为第一实施方式,以下使用附图对粒子束治疗系统的加速器1进行说明。

[0041] <概要>

[0042] 首先,说明加速器1的概要。将加速器1的外观示于图1,将其纵截面图示于图2,将横截面图示于图3。另外,在图3中,为了容易理解内部结构,也对不是截面的部分标注阴影线。图4表示加速器1的旋转轨道和等旋转相位线,图5表示代表性的旋转轨道的中心的移动。图6表示加速器的控制系统,图7表示旋转轨道的每个能量的主磁场强度。

[0043] 本实施方式的加速器例如是将碳离子加速至最大435MeV/u的频率调制型的可变能量加速器。

[0044] 如图1至图3所示,该加速器包括电磁铁11。电磁铁11具备隔着使离子束旋转的轨道面20a而对置的一对磁极123a、123b。由此,形成使轨道面20a产生多个旋转轨道(图4、图5)的主磁场。

[0045] 如图1和图2所示,在磁极123a、123b形成有射束入射用贯通孔115。射束入射用贯通孔115从外部将离子束25导入到轨道面20a的预定的入射位置130。

[0046] 如图2及图3所示,以夹着轨道面20a的方式在一对磁极123a、123b之间形成有预定形状的空隙(cavity)11a,在空隙11a内插入有高频加速空腔21。高频加速空腔21产生对在轨道面20a旋转的离子束进行加速的高频。

[0047] 在空隙11a的外周配置有附加磁场产生部(附加磁场产生用线圈),该附加磁场产生部对最外周和比最外周靠内侧的一个以上的旋转轨道上的离子束施加磁场而使偏离旋转轨道。并且,将偏离旋转轨道的离子束引导至空隙11a的外部的取出通道312被配置于空隙11a的外周。

[0048] 此时,电磁铁11所形成的主磁场的轨道面内的强度分布被设计为旋转轨道(代表性的旋转轨道01~012)成为图4、图5那样的配置。即,主磁场强度分布被设计为,根据旋转轨道的能量将图7所示的较大磁场(B)施加到该旋转轨道的位置。

[0049] 具体而言,图4、图5所示的旋转轨道随着离子束加速,旋转轨道(例如,图5的01~012)的半径逐渐变大,且其中心(C1~C12)在沿着空隙11a的预定的半径方向Rp向靠近周缘部的方向移动之后,将移动方向反转而朝向空隙11a的中心进一步移动。更详细而言,该半径达到预先决定的第一半径为止的旋转轨道(01~04)的中心(C1~C4)依次向接近空隙11a的周缘部的方向移动,达到第一半径后的旋转轨道(05~012)的中心(C5~C12)朝向轨道面20a的中心20c依次移动。

[0050] 这样,通过设计成在旋转轨道(例如01~04)的中心(C1~C4)暂时向接近轨道面20a的周缘部20b的方向移动之后,旋转轨道(例如05~012)的中心(C5~C12)朝向轨道面20a的中心20c移动,入射位置130与轨道面20a的周缘部20b的距离(图4、图5)宽于比较例(参照图12~图14)的加速器那样使旋转轨道的中心位置向一个方向移动的结构。

[0051] 换言之,能够将离子束的入射位置130配置成接近空隙11a的中心20c,射束入射用贯通孔115也被配置成接近磁极123a的中心轴20e。

[0052] 如图2所示,接近磁极123a的中心轴20e的区域中,磁极123a内的磁力线90相对于射束入射用贯通孔115的中心轴倾斜。因此,通过将射束入射用贯通孔115配置成接近磁极123a的中心轴20e,与图12的比较例相比,能够减少与离子束的行进方向(中心轴)正交的磁场分量。

[0053] 由此,在本实施方式的加速器1中,与图12的比较例相比,能够降低在射束入射用贯通孔115内离子束25从磁场90a受到的洛伦兹力,并能够降低施加于为了抵消洛伦兹力而

施加的离子束25的电场。因此,能够容易地施加足以使离子束25直行的电场,能够提高离子束25向入射位置130的入射效率,结果能够提高从加速器射出的离子束的剂量率。

[0054] 另一方面,通过设计成在旋转轨道(例如01~04)的中心(C1~C4)暂时向接近轨道面20a的周缘部20b的方向移动之后,使移动方向反转而使旋转轨道(例如05~012)的中心(C5~C12)朝向轨道面20a的中心20c移动,从而尽管入射位置130与轨道面20a的周缘部20b的距离比较例宽,也能够轨道面20a的周缘部20b附近与比较例(图12~图14)同样地形成旋转轨道密集地穿过的汇集区域241。

[0055] 因此,通过从配置于空隙11a的外周的附加磁场产生用垫片311向汇集区域241施加磁场,能够使最外周和比最外周靠内侧的一个以上的旋转轨道上的移动中的离子束的移动方向偏离旋转轨道,从取出通道312取出到空隙11a外。

[0056] 另外,优选射束入射用贯通孔115的中心轴与空隙11a的中心的距离设置在空隙11a的半径的长度的50%以内。

[0057] 也可以构成为,在磁极面124a上,在射束入射用贯通孔115与磁极123a的磁极123a的中心之间且与射束入射用贯通孔115相邻的位置配置铁片等垫片250。由此,配置有垫片250的区域的磁场梯度变大,因此如图4及图5所示,能够使旋转轨道(01~04)的中心(C1~C4)向接近空隙11a的外周的方向移动。特别是,在射束入射用贯通孔115与磁极123a的中心之间,沿着半径方向 R_p 的各位置的磁场梯度优选配置有垫片250的位置的磁场梯度最大。

[0058] 射束入射用贯通孔115及垫片250优选分别设置于隔着轨道面20a与对置的磁极123a、123b对称的位置。

[0059] 另外,优选一对垫片250之间的距离比射束入射用贯通孔115与磁极面124a的外周之间的沿预定的半径方向的位置且与离子入射用贯通孔相邻的位置251的一对磁极面124a、124b之间的距离或配置于该位置124a、124b的垫片的距离窄。

[0060] 在射束入射用贯通孔115与空隙11a的外周之间且沿着半径方向各位置的磁场梯度优选为空隙11a的周缘部的汇集区域241最大。由此,如图4及图5所示,能够在空隙11a的周缘部的汇集区域241密集地配置旋转轨道。

[0061] 在电磁铁11的外侧设置有向射束入射用贯通孔115入射离子束的离子源12。

[0062] 取出通道312优选配置于空隙11a的预定的半径方向 R_p 的外周部。

[0063] 优选在磁极面124a、124b具备多个环状的微调线圈(trim coil)33。微调线圈33具有与轨道面20a的多个旋转轨道对应的半径,设置于与旋转轨道对应的位置的磁极面124a、124b。

[0064] 高频加速空腔21包括D形电极221。D形电极221的边缘以与轨道面20a平行地横穿空隙11a的方式配置。D形(dee)电极221的形状为以入射位置130为中心的W字型。

[0065] 以下,对本实施方式的加速器1进行详细说明。

[0066] <<加速器1的结构>>

[0067] 如图1所示,加速器1具有能够以分割连接面12a为界上下分割的电磁铁11。如图2所示,电磁铁11具备:隔着分割连接面12a对置的圆柱形的上部磁极123a以及下部磁极123b;分别配置于它们的外周的圆筒形的旁轭121a、121b;以及圆盘状的上部顶板122a以及下部顶板122b。圆盘状的上部顶板122a配置为覆盖并连结上部磁极123a的上端面 and 旁轭121a的上端面。同样地,下部顶板122b配置为覆盖并连结下部磁极123b的下端面 and 旁轭

121b的下端面。在本实施例中,磁极123a、旁轭121a和顶板122a以及磁极123b、旁轭121b和顶板122b一体地形成。在形成于磁极123a与旁轭121a之间的凹部、以及形成于磁极123b与旁轭121b之间的凹部,分别配置有圆环状的线圈13。线圈13沿着磁极123的外周壁卷绕。

[0068] 将电磁铁11的上部磁极123a和下部磁极123b的相互对置的面定义为磁极面124a、124b。在由磁极面124a、124b夹着的空隙11a中,通过在线圈13中流过电流而在上下方向上形成主磁场110。磁极面124a、124b是隔着分割连接面12a对称的凹型的曲面形状,磁极面124a、124b间的距离在磁极123a、123b的中心轴20e处最大,越接近端部越小。

[0069] 空隙11a内的距磁极面124a、124b等距离的面为射束的轨道面20a,以轨道面20a为中心的预定厚度的圆盘状区域为射束穿过区域20。射束穿过区域20是加速/旋转中的射束穿过空隙11a内的区域。

[0070] 形成于射束穿过区域20的磁场的强度分布被设计成根据其位置的旋转轨道的能量而成梯度。关于磁场的梯度在后面详细说明。另外,电磁铁11的空隙11a内被省略了图示的真空泵抽真空。

[0071] 在电磁铁11设置多个连接外部与射束穿过区域20的贯通孔。具体而言,在上下的分割连接面11b的面上设置有取出加速后的射束的取出射束用贯通孔111、用于将配置于电磁铁11内的线圈导体向外部引出的引出用的贯通孔112、高频电力输入用贯通孔114等各种贯通孔。

[0072] 通过高频电力输入用贯通孔114,将高频加速空腔(加速电极)21插入到电磁铁11内。高频加速空腔21形成用于使空隙11a内的离子加速而成为离子束的加速用电场E。如后所述,高频加速空腔21包括加速用的D形电极221(参照图3)和用于调制加速用电场的频率的旋转式可变容量电容器(调制部)212。

[0073] 如图1所示,在电磁铁11的上表面的偏离中心轴20e的位置设置有用于供给离子(例如碳离子)的离子源12。并且,在离子源12的搭载位置,在顶板122a及磁极123a设置有射束入射用贯通孔115(参考图1)。离子源12射出的离子束25穿过射束入射用贯通孔115后,从入射位置130入射到空隙11a内。

[0074] 此时,由线圈13产生并通过磁极123a、旁轭121a及顶板122a而描绘闭环的磁力线90如图2所示以横穿射束入射用贯通孔115的方式通过。从离子源12射出的离子具有100KeV左右的能量,因此从离子源12至入射位置130,从射束入射用贯通孔115内的路径上的磁场90a受到洛伦兹力而行进方向偏转,以卷绕于磁力线90的方式进行漂移运动。

[0075] 为了对离子施加抵消该洛伦兹力的力,在射束入射用贯通孔115的附近以隔着射束入射用贯通孔115的方式配置有一对电极91。一对电极91对离子束25施加电场,产生与离子束25从磁场90a受到的洛伦兹力平衡的力。电极91施加的电场的方向是图2的箭头91a的方向。另外,在图2中,仅图示了一对电极91中的一方。施加于一对电极91的电力穿过射束入射用贯通孔115而从外部供给。在射束入射用贯通孔115中行进离子束25通过从一对电极91所产生的电场受到的力与从磁场90a受到的洛伦兹力平衡而在射束入射用贯通孔115内笔直地行进,从而能够到达空隙11a内的入射位置130。

[0076] 并且,虽未图示,但在射束入射用贯通孔115的入射位置130附近配置有偏转器,使在射束入射用贯通孔115内行进并从与轨道面20a垂直的方向到达入射位置130的离子束25的行进方向向与轨道面20a平行的方向偏转。由此,离子绕轨道面20a旋转。

[0077] 将插入到电磁铁11内的高频加速空腔21中的、特别是固定地配置在空隙11a内的部分定义为D形电极221。D形电极221为以从上下夹着射束穿过区域20的一部分区域的方式覆盖的一对板状电极。如图3所示，D形电极221的在面内方向上横穿射束穿过区域20的边缘221a成形为作为入射位置130附近的顶点的W字型。D形电极221的周缘部包围最外周轨道，且为沿着空隙11a的外周的圆弧形。高频加速空腔21的D形电极22以外的部分从D形电极22的圆弧状的周缘部贯通高频电力输入用贯通孔114，被引出到电磁铁11的外侧。

[0078] 如图1所示，在被引出到电磁铁11的外部的高频加速空腔21安装有旋转式可变量电容器(调制部)212。旋转式可变量电容器212具有旋转轴213，在旋转轴213上连接有伺服电动机214(参照图6)。伺服电动机214驱动旋转轴213旋转，旋转轴213的旋转角随时间变化，由此高频加速空腔21的静电电容随时间被调制，高频加速空腔21的基本模式的谐振频率变化。由此，能够使高频加速空腔21产生的加速用高频电场的频率变化。另外，在高频加速空腔21具备用于输入高频电力的输入耦合器211。

[0079] 在D形电极221的W字型的边缘221a的端面，以与该端面隔开预定的间隔对置的方式配置有W字型的线状的接地电极222。由D形电极221和接地电极222夹着的区域为加速间隙223。

[0080] 高频加速空腔21在加速间隙223激发用于通过 $\lambda/4$ 型的谐振模式对离子进行加速的加速用高频电场。从入射位置130入射的离子一边在射束穿过区域20的轨道面20a内旋转，一边穿过加速间隙223附近，由此通过被加速间隙223冷气的高频电场加速。

[0081] 为了与射束的旋转频率同步，高频加速空腔21在加速间隙223激发的高频电场的频率设定为射束的旋转频率的整数倍。具体而言，通过电动机控制装置41(参照图6)控制伺服电动机214，调整旋转轴213的旋转数。在本实施方式的加速器1中，在加速间隙223中以高频电场的频率成为射束的旋转频率的1倍的方式进行控制。

[0082] 为了对主磁场110在轨道面20a上的分布进行微调，在磁极123a、123b的磁极面124a、124b上具备多个系统的环状的微调线圈33。微调线圈33是与轨道面20a的多个旋转轨道对应的半径，设置于与旋转轨道对应的位置的磁极面124a、124b。例如，最大直径的微调线圈33的中心以与电磁铁11的中心20c一致的方式配置。另一方面，最小直径的微调线圈33的中心以与入射位置130一致的方式配置。即，关于微调线圈33的中心，直径小的中心相对于磁极123a、123b的中心偏心。微调线圈33的直径的尺寸和中心位置对应于离子束的轨道的直径和中心的位置。

[0083] 微调线圈33穿过贯通孔112等与外部的电源连接，向各系统的微调线圈33供给的励磁电流在运转前被分别调整。由此，在从磁极123a、123b向轨道面20a施加的主磁场110上重叠来自微调线圈33的磁场，使轨道面20a上的主磁场110的分布接近所希望的分布。由此，能够实现稳定的电子感应加速器振动，并且能够使离子的轨道的中心随着离子束的加速而向所希望的移动方向移动。关于离子的轨道中心的移动方向，在后面详细说明。

[0084] 另外，如图2及图3所示，为了向外取出在加速器1内加速的射束，在磁极面124a、124b的一部分以相对于磁极面124a、124b电绝缘的状态设置有对四极磁场或六极以上的多极磁场进行励磁的一对附加磁场产生用垫片(突跳(kick)部)311及用于对射束施加干扰用高频电场的干扰用电极(干扰部)313。另外，在磁极面124的端部的一处设置有取出通道312的入射部。

[0085] 干扰用电极313通过将微小振幅的高频(RF)电场作为干扰用高频电场施加于射束,使旋转中的射束的粒子的电子感应加速器振动振幅增大,并使其穿过附加磁场产生用垫片311激发的突跳磁场的作用所波及的区域。附加磁场产生用垫片311的突跳磁场使粒子向设计轨道的外侧使射束突跳,使其从设计轨道脱离。射束到达屏蔽取出通道312所形成的主磁场110的区域,在取出轨道322上通过,从加速器1的取出射束用贯通孔111取出至外部。由附加磁场产生用垫片311励磁的突跳磁场对在射束穿过区域20中旋转的离子束限制稳定区域,发挥将出现在稳定区域外的粒子导入取出通道312的作用。在本实施方式的加速器1中,附加磁场产生用垫片311为一对,是分别对磁极123所形成的主磁场110重叠励磁相反极性的磁场的结构。

[0086] 如此,通过打开/关闭干扰用电极313所产生的干扰用高频电场,能够与其同步地对射束的取出进行打开/关闭控制。关于干扰用电极313、取出通道312、附加磁场产生用垫片311的动作的详细情况在后面叙述。

[0087] 在加速器1中,以在轨道面上主磁场110的面内分量大致为0的方式设计上下磁极123a、123b、线圈13、微调线圈33、附加磁场产生用垫片311、取出通道312、干扰用电极313的形状和配置,成为相对于轨道面20a呈面对称的配置/电流分布。另外,如图3所示,在从上表面侧观察加速器1时,磁极123、D形电极221、线圈13、微调线圈33、干扰用电极313的形状成为相对于将贯通孔114的中心部与贯通孔112的中心部连结的线段11c左右对称的形状。

[0088] 使用图6对加速器1的控制部的结构进行说明。在高频加速空腔21的旋转式可变容量电容器212的旋转轴213上连接有对其进行旋转驱动的伺服电动机214。在伺服电动机214连接有电动机控制装置41。另外,在高频加速空腔21的输入耦合器211连接有生成高频电力的低电平高频产生装置42以及放大器43。此外,在干扰用电极313上连接有高频电源46,在该高频电源46上连接有要控制的干扰高频控制装置47。在低电平高频产生装置、电动机控制装置41以及干扰高频控制装置47上连接有控制它们的整体控制装置40。

[0089] 在本实施方式中,电压振幅计算装置45和治疗计划数据库60与整体控制装置40连接。在治疗计划数据库60中存储有多个照射位置、以及应按照每个照射位置照射的粒子束的能量及其剂量。整体控制装置40控制低电平高频产生装置42的输出,以在加速间隙223激发预先决定的振幅的高频电场。

[0090] 以下,对通过本实施方式的加速器1加速离子并射出所希望的能量的离子束(粒子束)时的各部的动作进行说明。

[0091] 《加速器1内的射束入射》

[0092] 在加速器1内,来自离子源12的离子入射到射束入射用贯通孔115内。离子从横穿射束入射用贯通孔115的磁力线90的磁场90a受到洛伦兹力而进行漂移运动,但通过电极91施加的电场施与适当的突跳,由此从大致与轨道面20a垂直的方向到达入射位置130附近,在轨道面20a附近,射束的运动方向通过偏转器(未图示)与轨道面20a平行地偏转。

[0093] 即,需要以在射束入射用贯通孔115内使离子束从磁场受到的力与来自电场的力均衡的方式设定电场的大小。因此,相对于射束运动方向铅垂的磁场即与轨道面20a平行的磁场越小,所需电场越小,并且射束轨道和尺寸的控制变得容易,能够实现入射效率的提高。

[0094] 因此,在本加速器1中,将入射位置130配置得比图12所示的比较例(现有构造)的

可变能量加速器更接近磁极123a、123b的中心20c。由此,能够将施加于在其正上方延伸的射束入射用贯通孔115的入射射束路径上的横向磁场充分减小至能够通过电场进行控制的大小。其结果是,与以往(图12)的可变能量加速器相比,入射射束量增加,能够使在一个运转周期可加速及照射的电荷量增加。

[0095] 另一方面,入射位置130靠近磁极123a、123b的中心,因此入射位置130与空隙11a的外周的间隔扩大。因此,为了将从轨道取出离子束的周缘部的汇集区域241的轨道的间隔缩小为与比较例(图12)的加速器的旋转轨道(图13)相同的程度,在本实施方式中,如图4及图5所示,随着旋转轨道的轨道半径从最小轨道变大,暂时使轨道的中心向空隙11a(轨道面20a)的周缘方向移动之后,随着轨道半径进一步变大而使轨道的中心朝向空隙11a(轨道面20a)的中心20c移动。

[0096] 《加速器1内的射束加速和取出》

[0097] 接着,对在本加速器1中旋转的射束的轨道及运动进行叙述。

[0098] 射束在射束穿过区域20中以入射位置130为中心旋转的同时每次穿过加速间隙223时被加速。作为一例,本实施方式的加速器1中的能够取出的射束的动能最小为140MeV/u,最大为430MeV/u。动能越大,射束的旋转频率越小,在刚入射后的动能射束中,达到了35MHz、430MeV的射束以22MHz在射束穿过区域20中旋转。这些能量与旋转频率的关系如图8所示。

[0099] 在加速器1中,由电磁铁11及微调线圈33形成的主磁场110沿着射束的轨道形成均匀且磁场随着能量变高而降低(参考图7)的分布。即,形成径向外侧的磁场降低的磁场。

[0100] 在这样的磁场下,从设计轨道向半径方向微小地偏移的粒子受到返回设计轨道那样的复原力,同时相对于轨道面向铅垂的方向偏移的粒子也在返回轨道面的方向上从主磁场110受到复原力。即,如果相对于射束的能量适当地减小磁场,则始终从设计轨道偏离的粒子向要返回设计轨道的方向作用恢复力,在设计轨道的附近振动(电子感应加速器振动)。由此,能够通过主磁场使射束稳定地旋转/加速。将各能量的射束中的主磁场110的值示于图7。主磁场110在入射位置130为最大的4.63T,在最外周降低至4.45T。

[0101] 上述的主磁场110分布通过在电磁铁11的线圈13和辅助其的微调线圈33中流过预定的励磁电流,磁极123a、123b被磁化,作为来自线圈13的磁场和来自磁极123a、123b的磁场的叠加而被激发。为了形成在离子的入射位置130增大磁场、朝向外周减小磁场的分布,磁极面124a、124b和垫片250的形状被确定为,磁极123a、123b的磁极面124a、124b相对的距离(间隙即空隙11a的高度)在空隙11a的中心部最大,朝向外周变小。并且,磁极面124的形状是相对于穿过间隙中心的平面(轨道面)面对称的形状,在轨道面上仅具有与轨道面垂直的方向的磁场分量。进而,通过调整对设置于磁极面的微调线圈33施加的电流来进行磁场分布的微调整,激发预定的主磁场110分布。

[0102] 各能量的轨道如图4所示。如图4所示,旋转轨道在最外侧存在与最大能量435MeV的轨道对应的半径为1.5m的圆轨道,从此处到0MeV为止存在以磁刚性率进行51分割的共计51根圆轨道。虚线是连结各轨道的同一旋转相位的线,称为等旋转相位线。

[0103] 如图5所示,本实施方式的加速器1中,随着射束的加速,射束的轨道中心(设计轨道)在轨道面内向一方向(半径方向Rp:图4的X=0中的Y方向)改变朝向的同时移动。设计轨道移动的结果,形成不同的动能的轨道相互接近的部位(旋转轨道汇集的区域:汇集区域

240、241) 和相互远离的区域(旋转轨道离散的区域: 离散区域242、243)。即, 射束的设计轨道偏心。

[0104] 在加速器1中, 存在两处设计轨道汇集的汇集区域240、241, 在任一汇集区域240、241中, 将设计轨道彼此最接近的设计轨道的各点(汇集点) 连结的线段成为与全部的设计轨道正交的线段。另外, 在两个离散区域242、243中, 连结设计轨道彼此最远离的设计轨道的各点的线段成为与所有设计轨道正交的线段。这两条线段存在于同一直线上(图4中 $X=0$ 的Y方向: 半径方向 R_p)。若将该直线定义为对称轴, 则设计轨道的形状相对于通过对称轴且与轨道面垂直的面呈面对称。

[0105] 在汇集区域240、241中, 磁场的空间梯度与周围相比变陡, 因此与此相应地通过对磁极123a、123b配置铁制的垫片250等来形成预定的磁场分布。特别是, 在本加速器1中, 磁场梯度在低能量侧的汇集点处成为最大。因此, 如图2所示, 在射束入射用贯通孔115的边缘配置有垫片250。此外, 在图2中, 省略了配置于汇集区域241的垫片的图示。

[0106] 图4所示的等旋转相位线从汇集区域按每个旋转相位 $\pi/20$ 绘制。在D形电极221和与D形电极221对置的接地电极222之间形成的加速间隙223沿着从集约点来看旋转了 ± 90 度的等旋转相位线244设置。等旋转相位线244如图4所示是以入射位置130为中心的W字型, 因此D形电极221的边缘221a和接地电极222是隔着等旋转相位线244对置、且沿着等旋转相位线244的形状的W字型。

[0107] 如上所述, 高频加速空腔21在加速间隙223激发高频电场。如上所述, 如图6所示, 在高频加速空腔21通过输入耦合器211(参照图1) 连接有低电平高频产生装置42以及放大器43。在高频加速空腔21中, 被导入由低电平高频产生装置42产生并由放大器43放大后的高频电力, 由此在高频加速空腔21的D形电极221与接地电极222之间的加速间隙223激发高频电场。通常, 由D形电极221激发的电磁场是由电极形状和旋转式可变容量电容器212具有的静电电容决定的特定谐振频率和空间分布的电磁场。在该情况下, 当射束穿过加速间隙时, 在加速间隙223的各处从D形电极221相对于接地电极222在某一时刻产生相同方向的电场, 当射束经过半周而穿过相反侧的加速间隙时在与之前的方向相反的方向上产生电场。其结果, 能够在射束穿过加速间隙223时从电场向要加速的方向施加力, 一边旋转一边增大射束能量。

[0108] 在本发明的加速器1中, 与射束的旋转同步地激发高频电场, 因此与旋转中的射束的能量对应地如图8的曲线图那样调制电场的频率, 并将射束逐渐加速至所希望的能量(图8)。在使用了谐振模式的高频加速空腔21中, 需要在比谐振的幅度宽的范围内扫描高频的频率。因此, 也需要变更高频加速空腔21的谐振频率。该控制通过使设置于高频加速空腔21的端部的旋转式可变容量电容器212的静电容量变化来进行。在旋转式可变容量电容器212的旋转轴213上连接有导体板, 通过使旋转轴213旋转, 能够通过旋转轴213的旋转角来控制导体板与外部导体之间产生的静电容量。即, 通过使旋转轴213的旋转角随着射束的加速而变化, 能够变更高频加速空腔21的谐振频率。

[0109] 接着, 进一步说明本实施方式的加速器1的射束入射到取出为止的射束的行为。

[0110] 首先, 从离子源12输出低能量的离子, 经由射束入射用贯通孔115及入射位置130向射束穿过区域20引导射束。

[0111] 从离子源12入射至射束入射用贯通孔115内时, 离子从横穿射束入射用贯通孔115

的磁力线90的磁场90a受到洛伦兹力而进行漂移运动,但通过电极91所施加的电场施加适当的突跳,由此从大致与轨道面20a垂直的方向到达入射位置130附近,在轨道面20a附近,射束的运动方向通过偏转器(未图示)与轨道面20a平行地偏转。

[0112] 此时,在本实施方式中,将射束入射用贯通孔115及入射位置130配置得比图12、图13所示的比较例(现有构造)的可变能量加速器更接近磁极123a、123b的中心20c,因此能够减少磁场90a的与入射射束路径正交的分量。因此,能够使施加与洛伦兹力平衡的突跳的电极91的电场比图12的比较例小。其结果,与图12的比较例相比,能够入射到入射位置130的入射射束量增加,能够在一个运转周期使可加速以及照射的电荷量增加。

[0113] 入射于射束穿过区域20的射束在每次穿过加速间隙223时受到基于高频电场的加速,其能量增大,并且使轨道的旋转半径增加。之后,射束一边确保基于高频电场的行进方向稳定性,一边加速至所希望的能量。

[0114] 如上所述,在加速间隙223激发的高频电场的频率被设定为以射束的旋转频率的正好整数倍的比同步。在本实施方式中,设定为粒子不是在高频电场成为最大的时刻穿过加速间隙223,而是在高频电场随时间减少的预定的相位穿过加速间隙223。因此,以高频电场的预定的相位穿过加速间隙223而被加速的粒子在下一圈(turn)也以大致相同的相位穿过加速间隙223而被加速。另一方面,以比高频电场的预定的相位早的相位穿过加速间隙223而被加速的粒子与以预定的相位穿过加速间隙223而被加速的粒子相比,其加速量大,因此在下一圈中,以比之前的圈晚的相位穿过加速间隙223而受到加速。另外,相反地,以比预定的相位慢的相位穿过加速间隙223而被加速的粒子与以预定的相位穿过加速间隙223而被加速的粒子相比,其加速量较小,因此在下一圈中,以比之前的圈前进的相位穿过加速间隙而受到加速。这样,对于从预定的相位偏离的时刻(timing)穿过加速间隙223的粒子,返回预定的相位的复原作用起作用,通过该作用,在由运动量方差(分散) Δp 和高频的相位构成的相位平面(行进方向)内稳定地振动。将该振动称为同步加速器振动。即,加速中的粒子一边进行同步加速器振动,一边逐渐被加速,达到预定的能量。在进行稳定的同步加速器振动期间,各个粒子在相位平面上在被称为高频桶(bucket)的稳定区域内进行旋转运动。

[0115] 整体控制装置40为了以目标能量从加速器1取出预定的取出射束,逐渐降低施加于高频加速空腔21的高频电场的振幅,并以在射束达到目标能量时高频电场的振幅成为0的方式控制低电平高频产生装置42和放大器43的输出。由此,射束以目标能量稳定地在加速器1内旋转。

[0116] 在该状态下,若对干扰用电极313施加与射束的电子感应加速器振动的频率一致的高频电压,则射束受到依赖于行进方向的位置、即穿过干扰用电极313的时刻的干扰。若着眼于特定的粒子,则由于干扰用电场与旋转的电子感应加速器振动的频率一致,因此两者谐振,某粒子的电子感应加速器振动振幅增大。若该粒子的电子感应加速器振动振幅持续增大,则穿过设置于设计轨道的外侧的附加磁场产生用垫片311激发的突跳磁场的作用所波及的区域。由此,受突跳磁场的作用,电子感应加速器振动急剧发散,从设计轨道观察,射束向外侧位移。其结果,射束到达取出通道312,在取出轨道322上通过,从加速器1的取出射束用贯通孔111取出至外部。

[0117] 如上所述,射束在加速器1内达到目标能量之后至从加速器1取出为止的期间,构成射束的各个粒子通过附加磁场产生用垫片311所形成的四极磁场及六极以上的多极磁

场,在由射束的水平方向的位置和斜率确定的相位空间上,以分为能够稳定地旋转的区域和轨道偏离不稳定地持续增大的区域的状态旋转。将该稳定区域与不稳定区域的边界称为分界面(Separatrix)。

[0118] 另外,若施加于干扰用电极313的电场被切断,则射束的电子感应加速器振动振幅的增大停止,射束在稳定区域内旋转,因此能够停止射束的取出。

[0119] 使用图9的图表和图10的流程图,对通过如上所述的原理使射束加速并将某一个能量的射束取出至加速器1外时的各设备的控制动作进行说明。

[0120] 图9的图表的纵轴从上依次表示旋转式可变容量电容器212的旋转轴213的旋转角、高频加速空腔21的谐振频率、输入到高频加速空腔21的高频电力的频率、加速间隙223中的高频电场的电压振幅、离子源12输出的射束电流波形、输入到干扰用电极313的干扰用高频电场的振幅、加速器1内的射束的水平发射度(射束尺寸)、从加速器1输出的射束电流波形。图9所示的图表的横轴全部为时间。

[0121] 图10的流程表示整体控制装置40以及电压振幅计算装置45的动作。整体控制装置40和电压振幅计算装置45由具备CPU(Central Processing Unit:中央处理单元)、GPU(Graphics Processing Unit:图形处理单元)等处理器和存储器的计算机等构成,CPU读入并执行存储器中存储的程序,由此利用软件实现图10的流程的动作。另外,整体控制装置40和电压振幅计算装置45的一部分或全部也可以通过硬件来实现。例如,使用ASIC(Application Specific Integrated Circuit:专用集成电路)那样的定制IC、FPGA(Field-Programmable Gate Array:现场可编程门阵列)那样的可编程IC构成整体控制装置40以及电压振幅计算装置45的一部分或者全部,以实现图10的流程的动作的方式进行电路设计即可。

[0122] 如果从用户指示了射束的照射开始,则在图10的步骤111中,电压振幅计算装置45从治疗计划数据库60读入应照射的射束的能量。

[0123] 接着,在步骤112中,整体控制装置40计算为了使射束加速至应照射的射束的能量所需的高频电场的施加时间T。具体而言,整体控制装置40根据确定了与按照射束的能量预先求出的加速至该能量所需的高频电场的施加时间T之间的关系表、数学式,计算加速至所读入的射束的能量所需的高频电场的施加时间T。另外,整体控制装置40根据确定了按照射束的能量预先求出的电压降低时刻Td的关系表、数学式,计算与所读入的射束的能量对应的降低开始时刻T1d。该降低开始时刻T1d是在该时刻使向高频加速空腔21的高频电力的电压振幅降低或者停止的情况下,在加速间隙223的加速用高频电场成为0的时间点,预计射束达到目标能量的时刻。

[0124] 在步骤113中,整体控制装置40指示电动机控制装置41使伺服电动机214动作,如图9所示,使旋转式可变容量电容器212的旋转轴213以预定的角速度旋转。根据该旋转轴213的旋转角,如图9所示,高频加速空腔21的基本模式的谐振频率 f_1 周期性地变化。在该时间,加速用的高频电力还未输入到高频加速空腔21。

[0125] 在步骤114中,如图9所示,整体控制装置40从运转周期刚开始后,在预定时间内从离子源12输出射束。由此,离子束从加速器1的入射位置130向加速器1的内部入射预定时间。

[0126] 此时,从电极91向射束入射用贯通孔115施加预先计算的大小的电场,使其与离子

束所受到的洛伦兹力平衡,提高离子束向入射位置130的入射效率。

[0127] 在步骤115中,从离子源12刚入射之后起,整体控制装置40将以在步骤111中由电压振幅计算装置45计算出的电压振幅E1且与根据旋转轴213的旋转角而变化的高频加速空腔21的基本模式的谐振频率f1同步的频率f2的高频电力从低电平高频产生装置42以及放大器43输入到高频加速空腔21。由此,入射到加速器1的能够进行稳定的同步加速器振动的范围的射束穿过加速间隙223,从而一边被高频电场E加速一边在加速器1的内部旋转。与此相对,同步加速器振动不稳定的粒子不被加速而与加速器1内部的构造物碰撞并消失。随着谐振频率降低,射束加速,加速至预定的取出能量附近。

[0128] 在步骤116中,如果从高频电力的输入开始达到在步骤112中确定的时刻T1d,则使高频电压的振幅E停止。高频加速空腔21产生的加速用高频电场基于高频加速空腔21的谐振的Q值而电压振幅逐渐变小(渐减),上述的高频桶逐渐消失。

[0129] 在步骤117中,整体控制装置40指示干扰高频控制装置47从该时刻T1d开始高频干扰的上升。由此,干扰高频控制装置47使高频电源46动作,向干扰用电极313输出高频电力。从高频电源46向干扰用电极313输出的高频电力的电压值由干扰高频控制装置47控制,其指定值作为根据取出射束能量和取出射束的输出电流唯一确定的值由治疗计划数据库60确定,由整体控制装置40指示。干扰用电极313产生干扰用高频电场,在加速器1旋转的射束因该电场而受到干扰,如图9所示,水平方向的发射度增大。

[0130] 在步骤118中,在经过了步骤112中确定的施加时间T的时间点,加速用高频电场的电压振幅变为零。在加速用高频电场的电压振幅变得足够小的时间点,加速器1内的射束达到预定的取出能量。

[0131] 同时,射束的水平发射度(射束尺寸)因来自干扰用电极313的干扰高频电场的作用而增大,穿过附加磁场产生用垫片311激发的突跳磁场的作用所波及的区域,到达取出用切割电磁铁312形成的磁场所波及的范围,在取出轨道322上通过,被从加速器1的取出射束用贯通孔111取出至外部。

[0132] 在步骤119中,整体控制装置40继续对干扰用电极313施加干扰高频电力,直到取出射束的时间经过由治疗计划数据库60预先决定的时间为止。在此期间,通过干扰用电极313的干扰用高频电场的作用,继续从加速器1取出射束。射束取出时间被设定为从加速器1全部取出旋转中的全部电荷、或者取出的射束达到由治疗计划决定的预定的照射剂量的时间。在本实施方式中,能够进行以高效率从加速器1取出射束时的取出,因此能够将射束取出时间设定得比以往短。

[0133] 在此期间,附随于高频加速空腔21的伺服电动机214继续旋转,谐振频率继续变动,但由于未对高频加速空腔21输入加速用高频,因此几乎不产生针对射束的影响。因此,射束以固定的能量持续旋转,通过所施加的干扰高频依次被取出。

[0134] 如果经过了射束取出时间,则整体控制装置40进入步骤120,停止对干扰用电极313施加干扰高频电力。虽然取决于扰动高频的强度,但是可以通过打开/关闭扰动高频来控制射束的打开/关闭。此外,如图9所示,也能够比运转周期长的期间取出射束。另外,这里所说的运转周期是从谐振频率成为最大的时刻到下一个成为最大的时刻的期间。

[0135] 当照射结束时,返回步骤111,电压振幅计算装置45从治疗计划数据库读入接下来应取出的射束的能量。步骤112以后与上述的流程同样地进行。在图9所示的例子中,在后半

的运转周期中,照射能量比前一运转周期大的射束,因此将高频电场的施加时间T2设定为比前一运转周期的加速用高频电场的施加时间T1长,将射束加速至较大的能量。

[0136] 本实施方式的加速器通过在射束入射用贯通孔115的位置及旋转轨道的移动方向上下功夫,从而为小型且能够变更取出射束的能量的加速器,并且能够提高从外部离子源向加速器内的射束入射的效率。其结果,能够提高射出的离子束的剂量率。

[0137] 《第二实施方式》

[0138] 使用图11对本发明的第二实施方式的粒子束治疗系统进行说明。对与第一实施方式相同的结构标注相同的附图标记,并省略说明。

[0139] 第二实施方式是使用了第一实施方式的加速器1的粒子束治疗系统。图11表示系统的整体结构图。

[0140] 粒子束治疗系统1000是根据患部距体表的深度对患者5的患部(目标)照射适当能量值的质子束或碳束(以下统称为射束)的装置。如图11所示,粒子束治疗系统1000具备:加速器1,其对离子进行加速;射束输送系统2,其对后述的照射装置输送由加速器1加速后的射束;照射装置3,其对固定于治疗台4的患者5内的目标照射由射束输送系统2输送的射束;整体控制装置40以及照射控制装置50,其控制加速器1、射束输送系统2以及照射装置3;治疗计划装置70,其制作针对目标的射束的照射计划;以及治疗计划数据库60,其存储有由该治疗计划装置70制作的治疗计划。另外,加速器1上连接有第一实施方式中说明的取出通道312,能够通过第一实施方式中说明的结构取出射束。

[0141] 在粒子束治疗系统1000中,照射的粒子束的能量和剂量通过读入治疗计划数据库60中存储的治疗计划的数据来决定。将治疗计划所决定的粒子束的能量和照射量从整体控制装置40依次输入到照射控制装置50,在照射了适当的照射量的时间点转移到下一个能量而再次照射粒子束。

[0142] 另外,粒子束治疗系统1000的射束输送系统2并不限于图11所示那样的被固定的系统,能够设为能够按照被称为旋转机架的照射装置而绕患者5旋转的输送系统。另外,照射装置3不限于一个,能够设置多个。而且,能够设为不设置射束输送系统2而从加速器1直接对照射装置3输送射束的方式。

[0143] <其他>

[0144] 此外,本发明并不限于上述的实施方式,包含各种变形例。上述实施方式是为了容易理解地说明本发明而详细说明的实施方式,并不限于必须具备所说明的全部结构。

[0145] 符号说明

[0146] 1…加速器

[0147] 2…射束输送系统

[0148] 3…照射装置

[0149] 11…电磁铁

[0150] 12…离子源

[0151] 13…线圈

[0152] 20…射束穿过区域

[0153] 20a…轨道面

[0154] 21…高频加速空腔

- [0155] 33…微调线圈
- [0156] 40…整体控制装置
- [0157] 41…电动机控制装置
- [0158] 42…低电平高频产生装置
- [0159] 43…放大器
- [0160] 46…高频电源
- [0161] 47…干扰高频控制装置
- [0162] 50…照射控制装置
- [0163] 60…治疗计划数据库
- [0164] 91…电极
- [0165] 111…取出射束用贯通孔
- [0166] 112…线圈连接用贯通孔
- [0167] 114…高频电力输入用贯通孔
- [0168] 115…射束入射用贯通孔
- [0169] 121…旁轭
- [0170] 122…顶板
- [0171] 123…磁极
- [0172] 130…入射位置
- [0173] 211…输入耦合器
- [0174] 212…旋转式可变容量电容器
- [0175] 213…旋转轴
- [0176] 214…伺服电动机
- [0177] 221…D形电极
- [0178] 222…接地电极
- [0179] 223…加速间隙
- [0180] 311…附加磁场产生用垫片
- [0181] 312…取出通道
- [0182] 313…干扰用电极
- [0183] 322…取出轨道
- [0184] 1000…粒子束治疗系统。

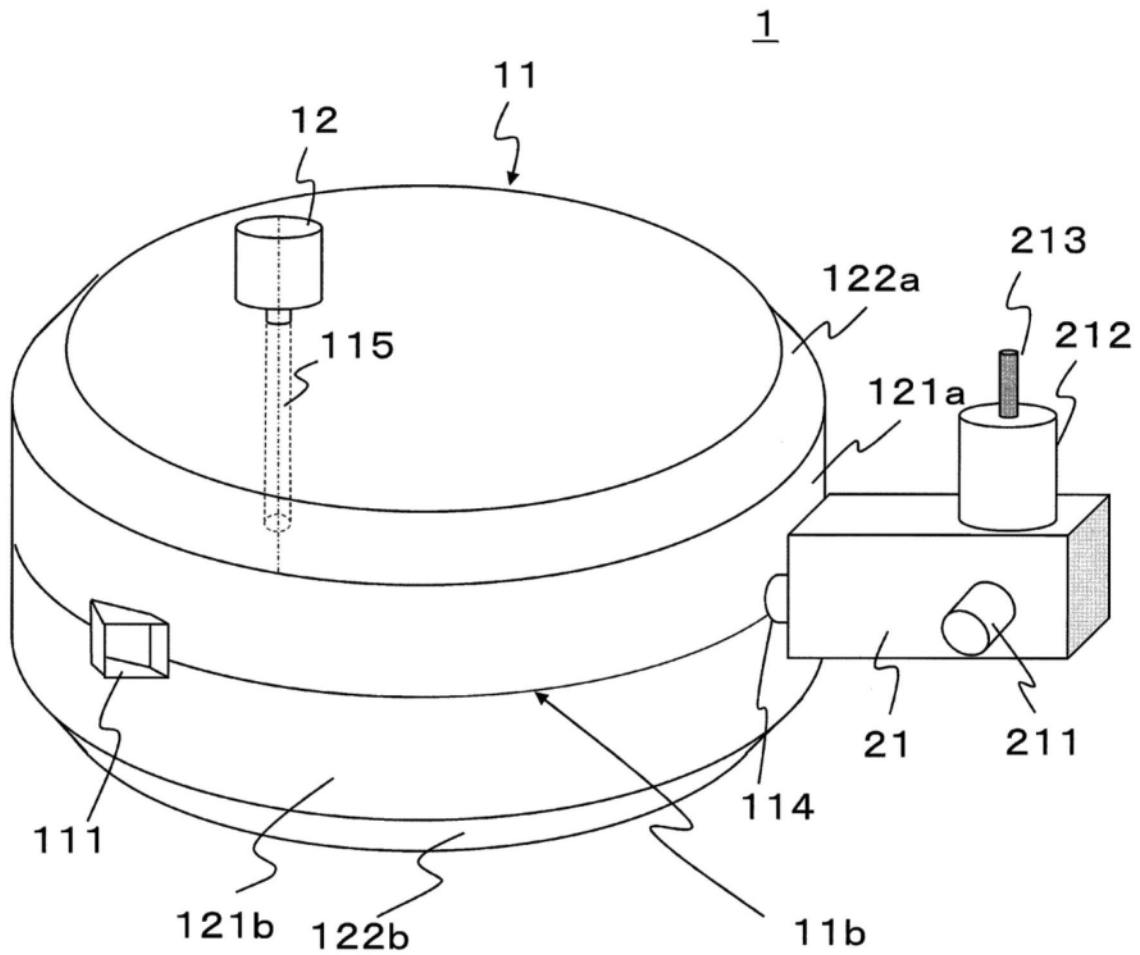


图1

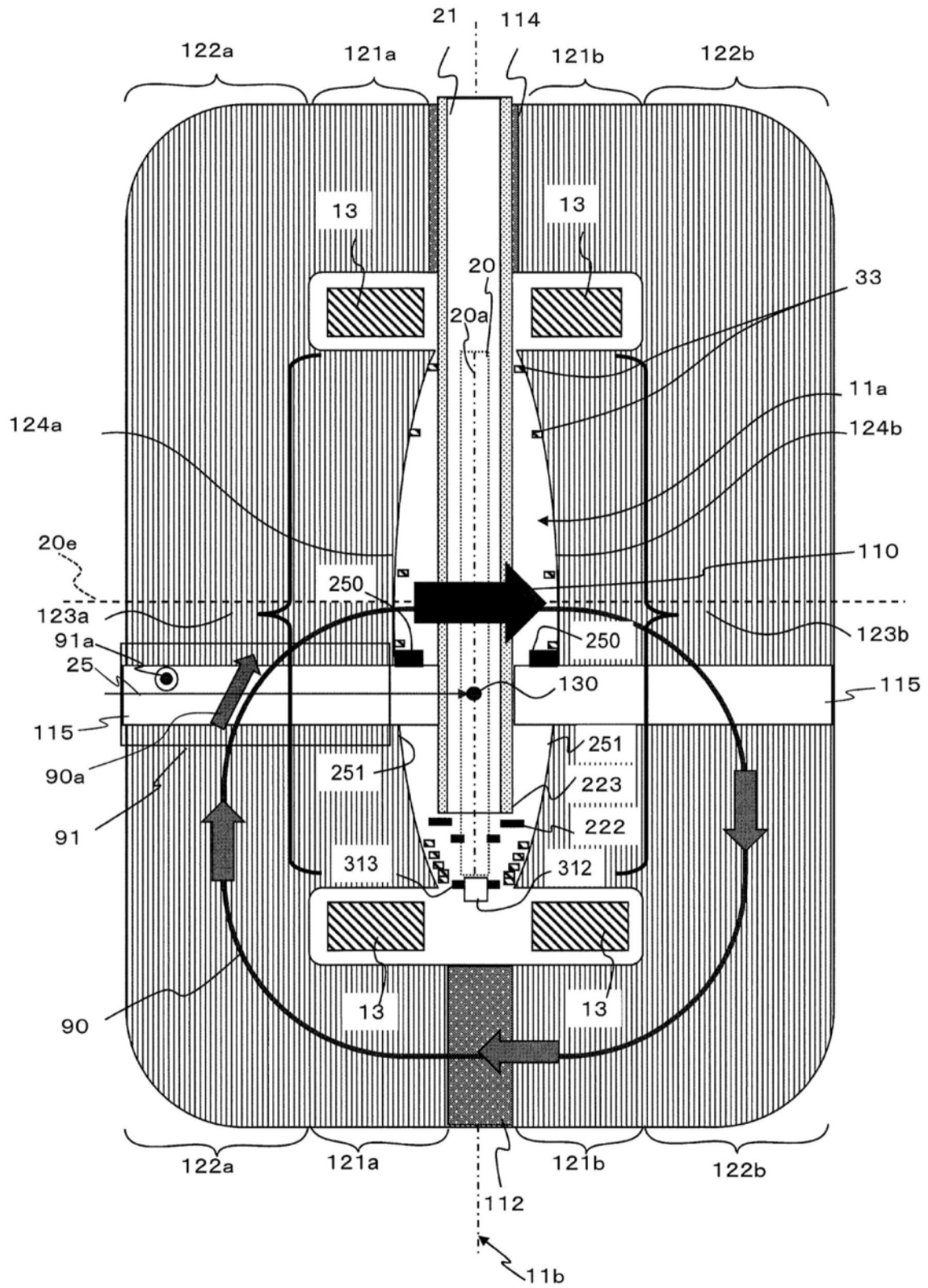


图2

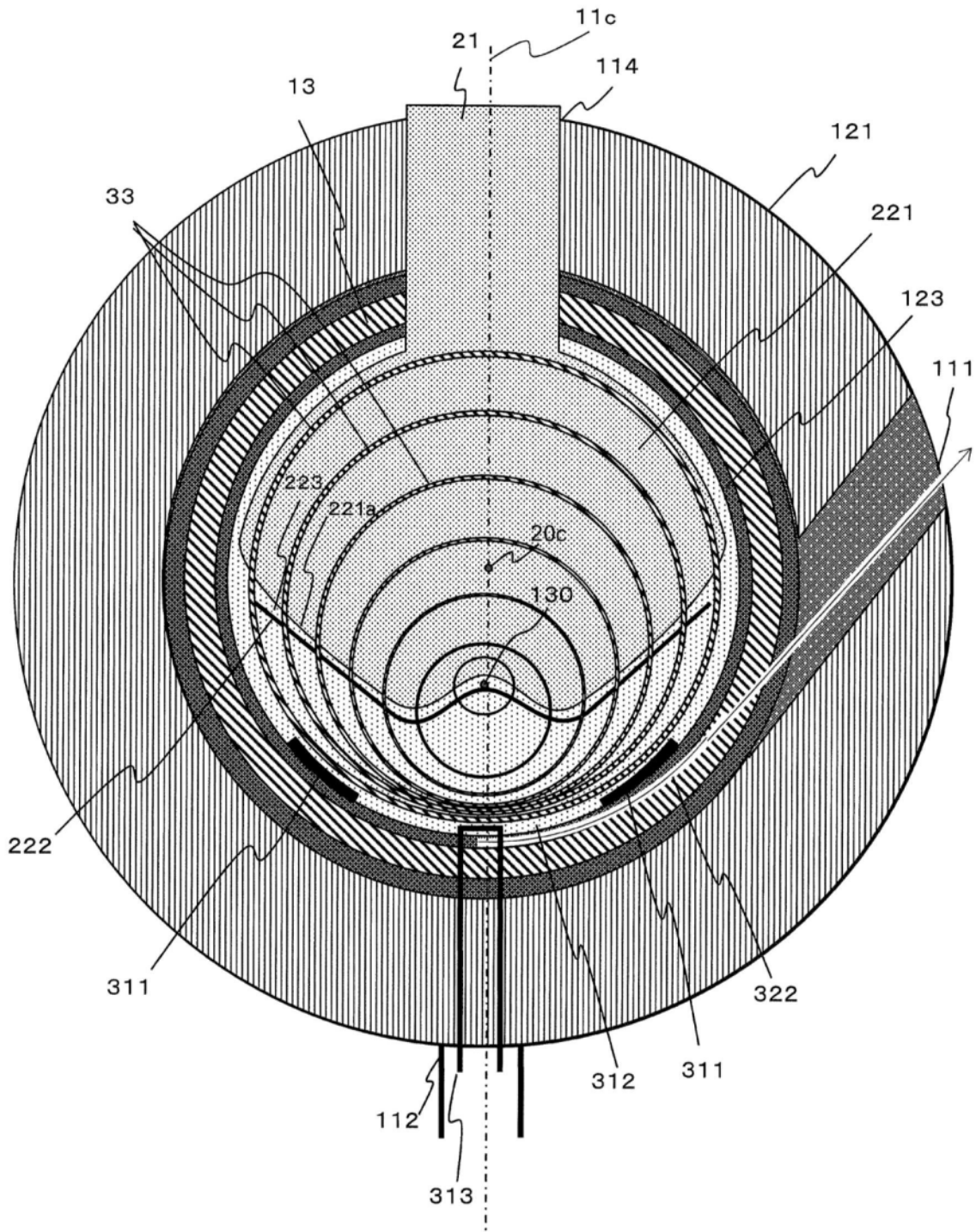


图3

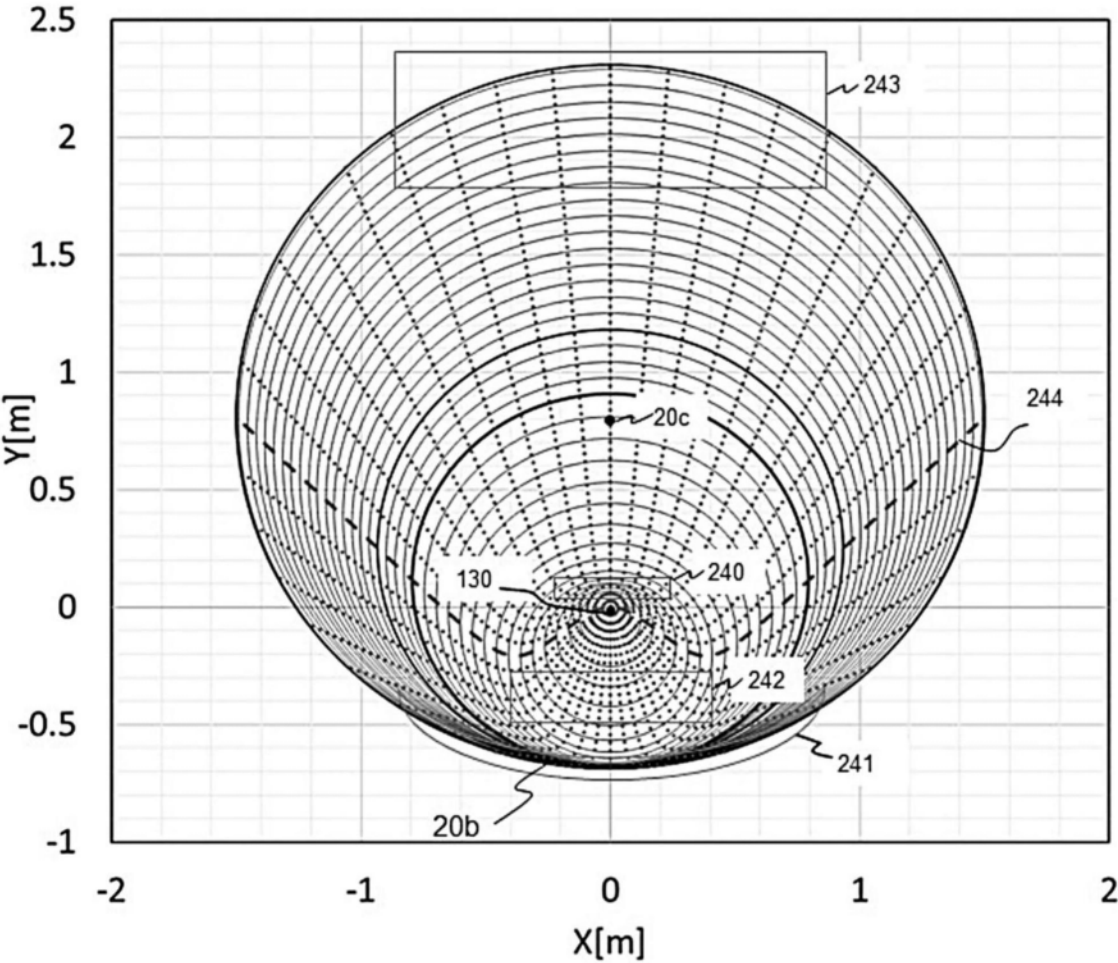


图4

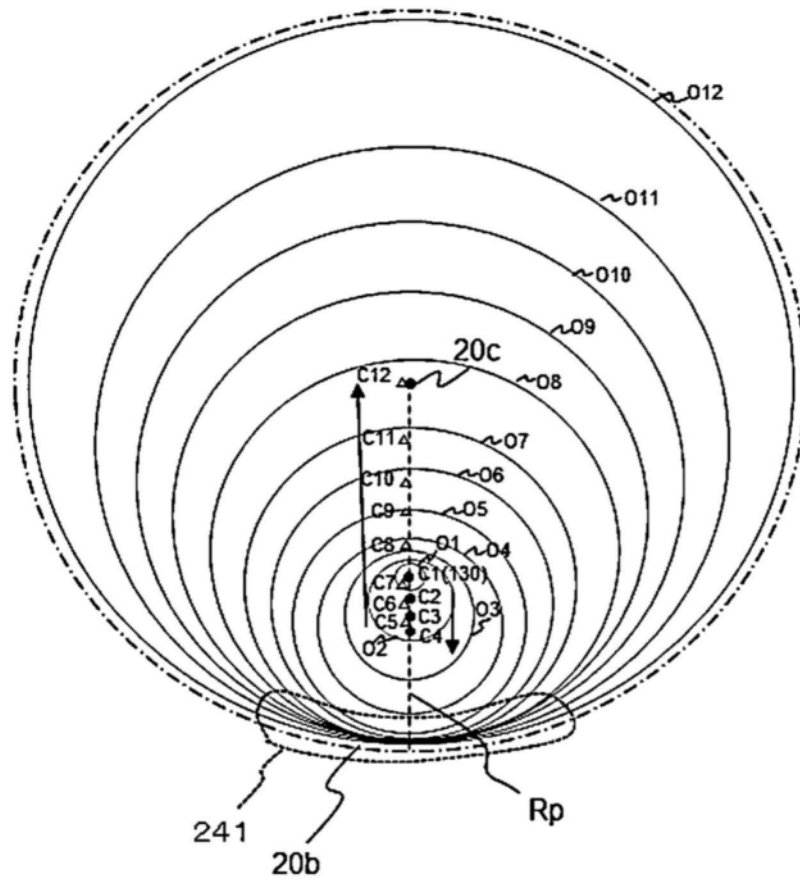


图5

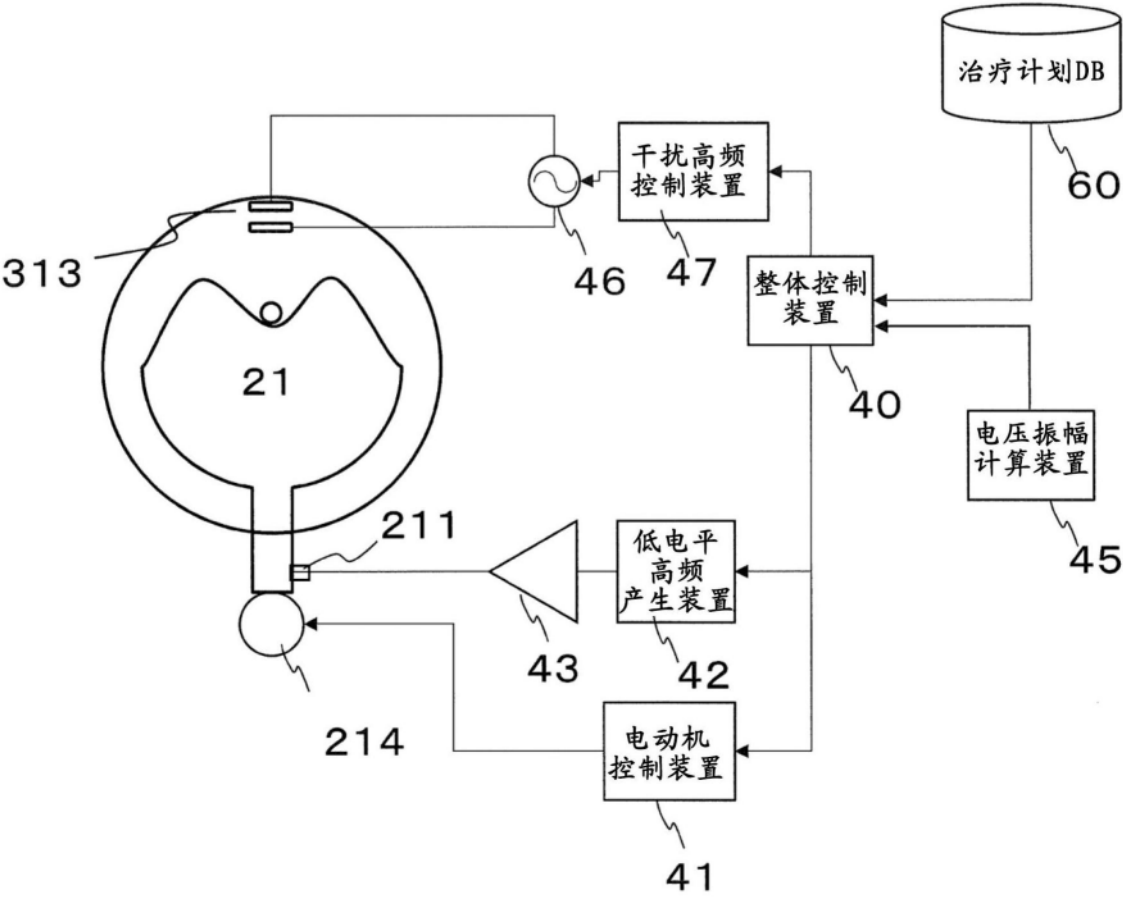


图6

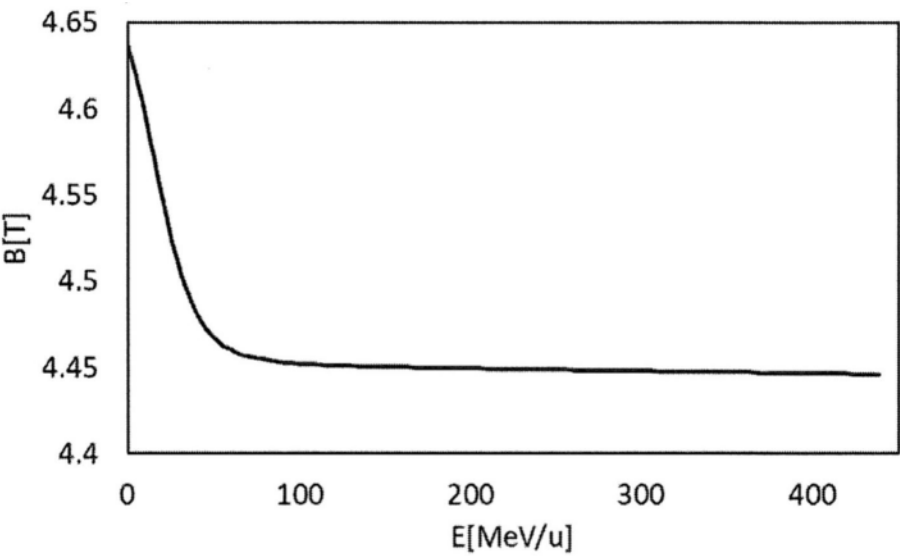


图7

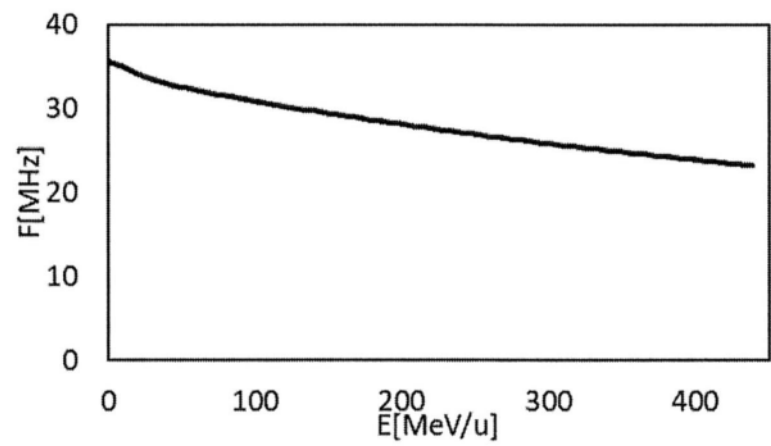


图8

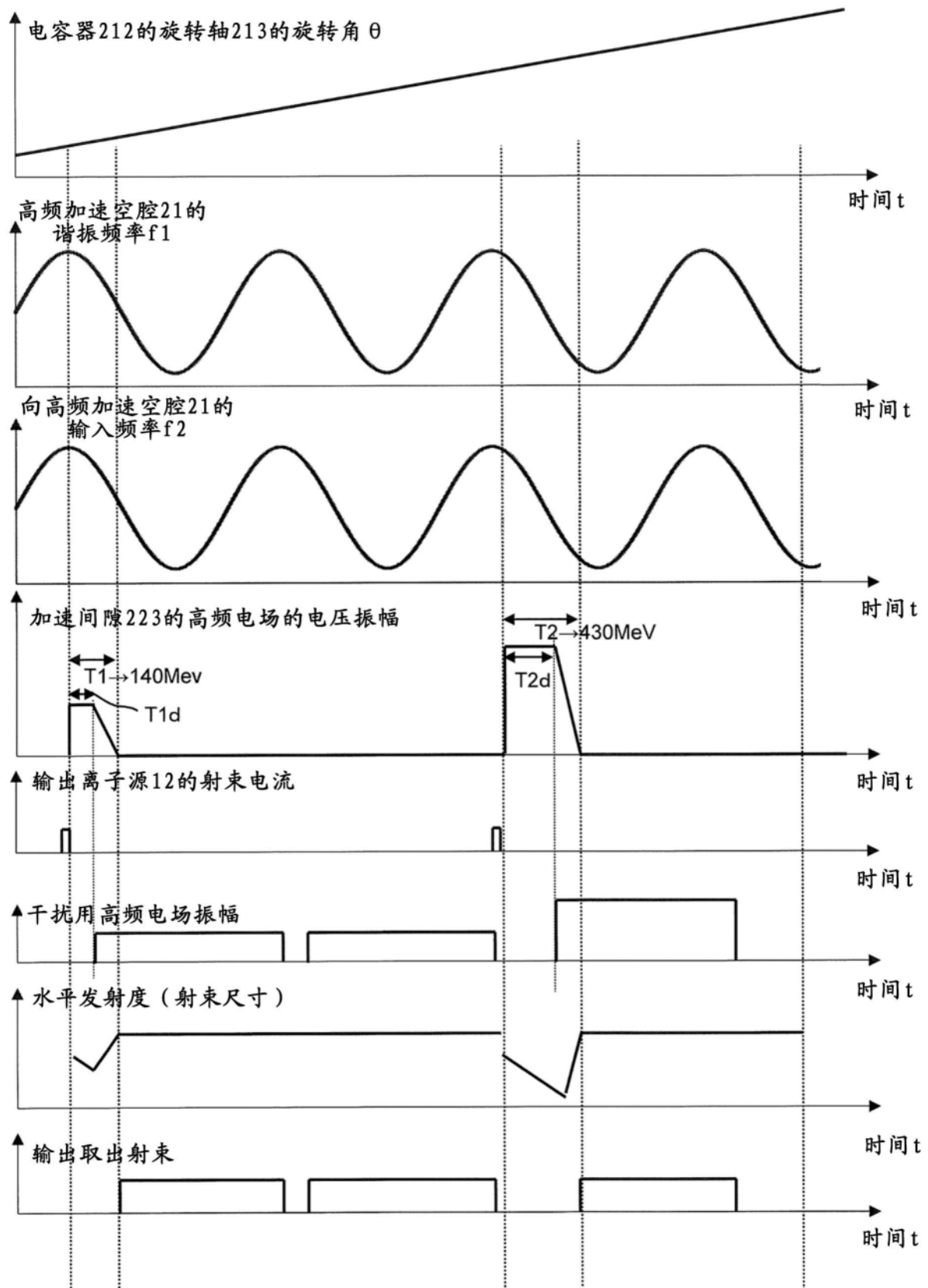


图9

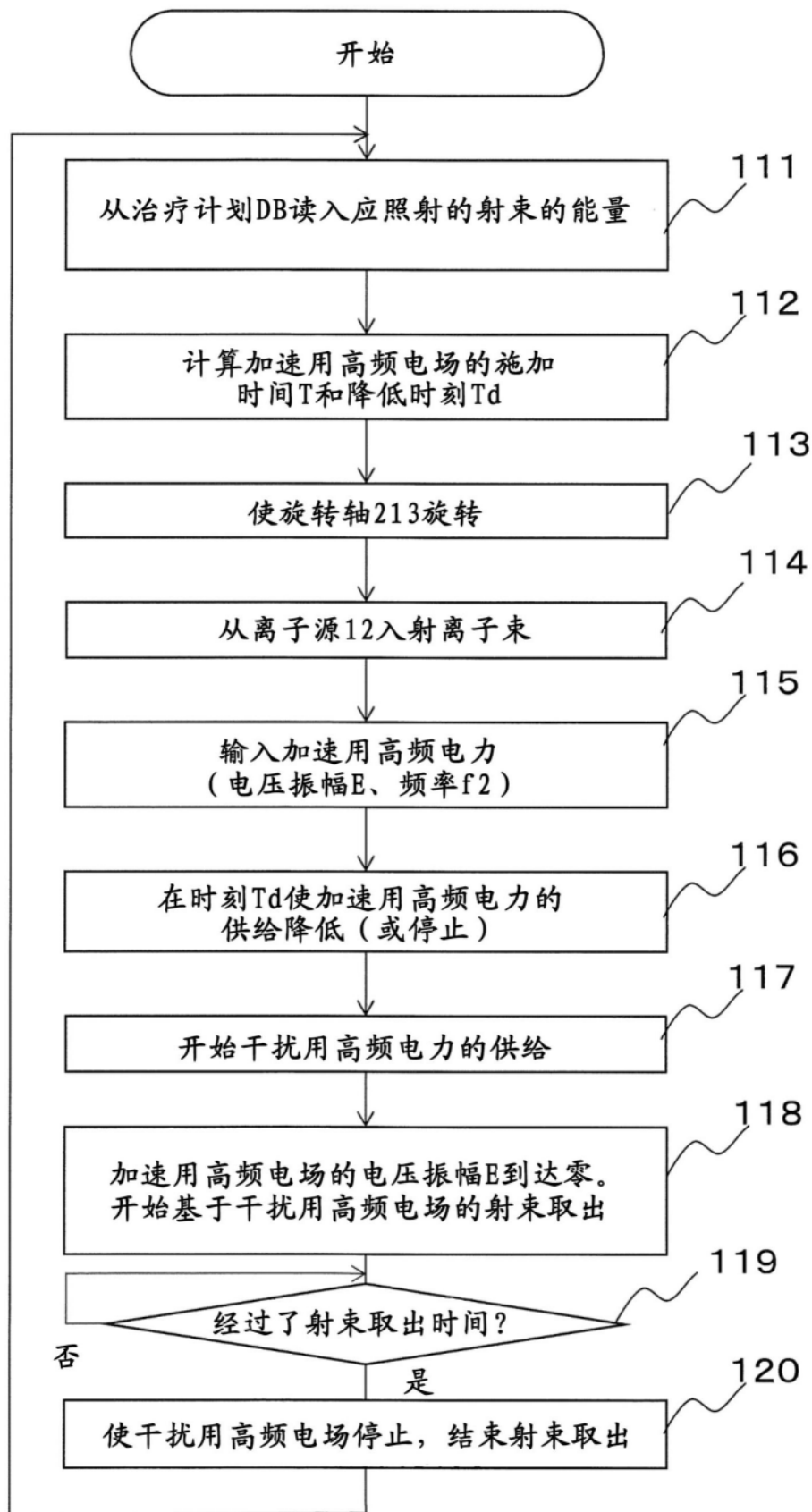


图10

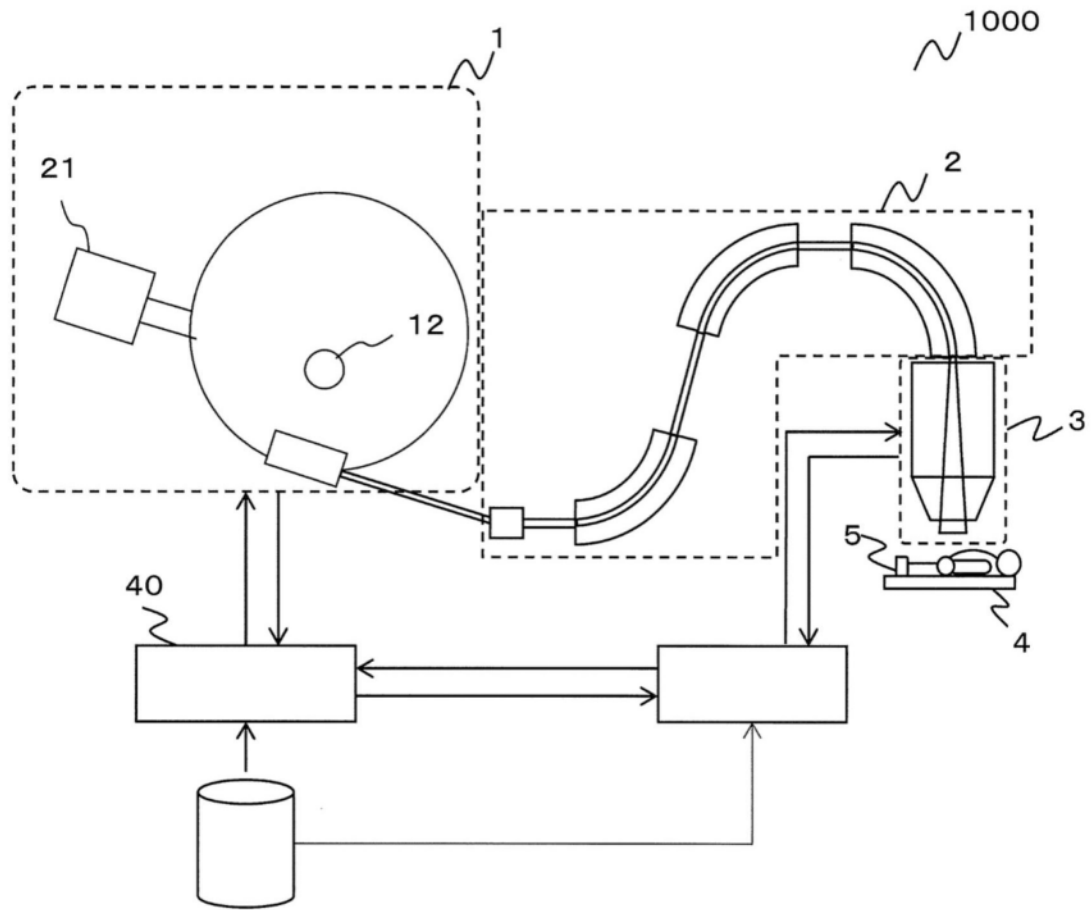


图11

参考技术

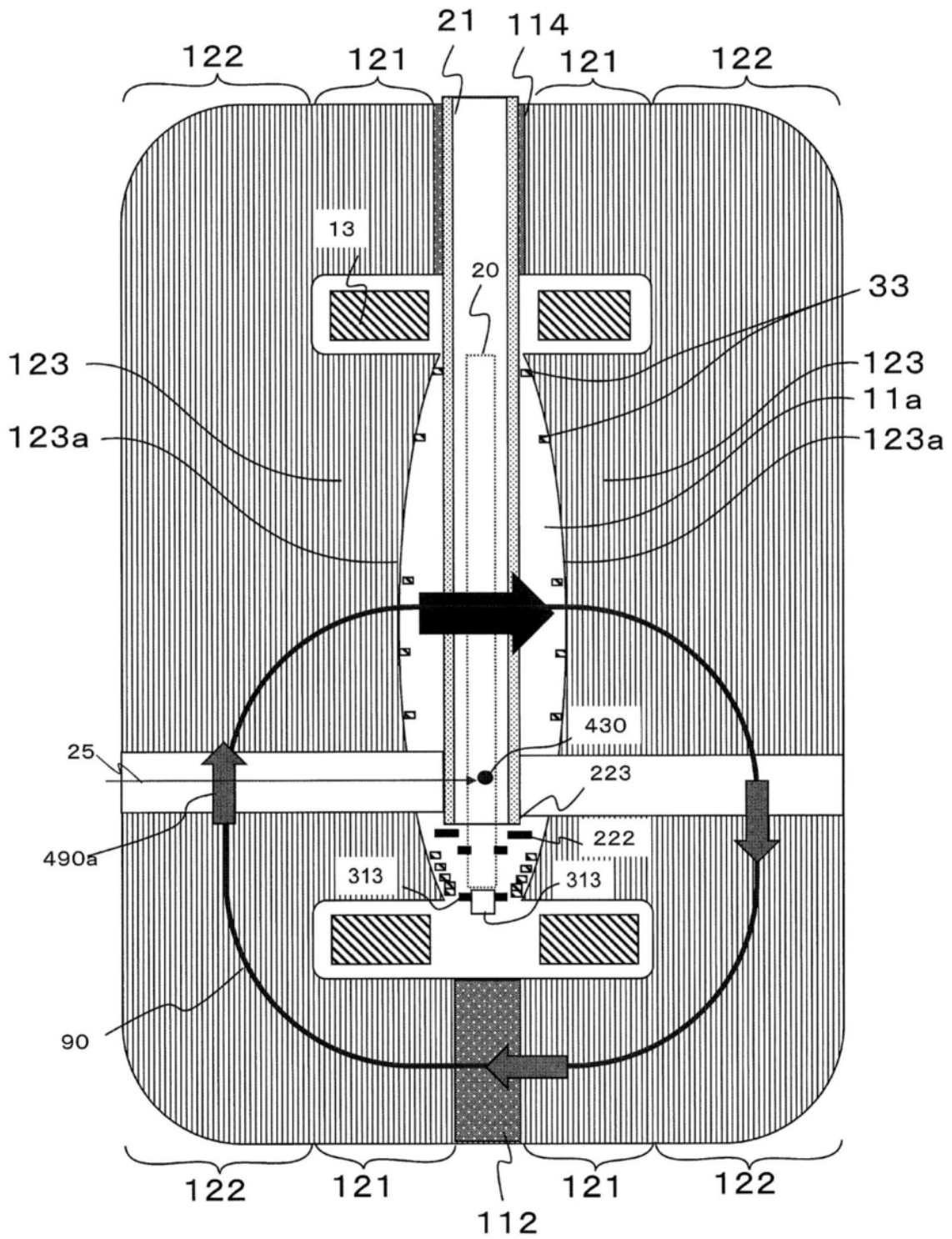


图12

参考技术

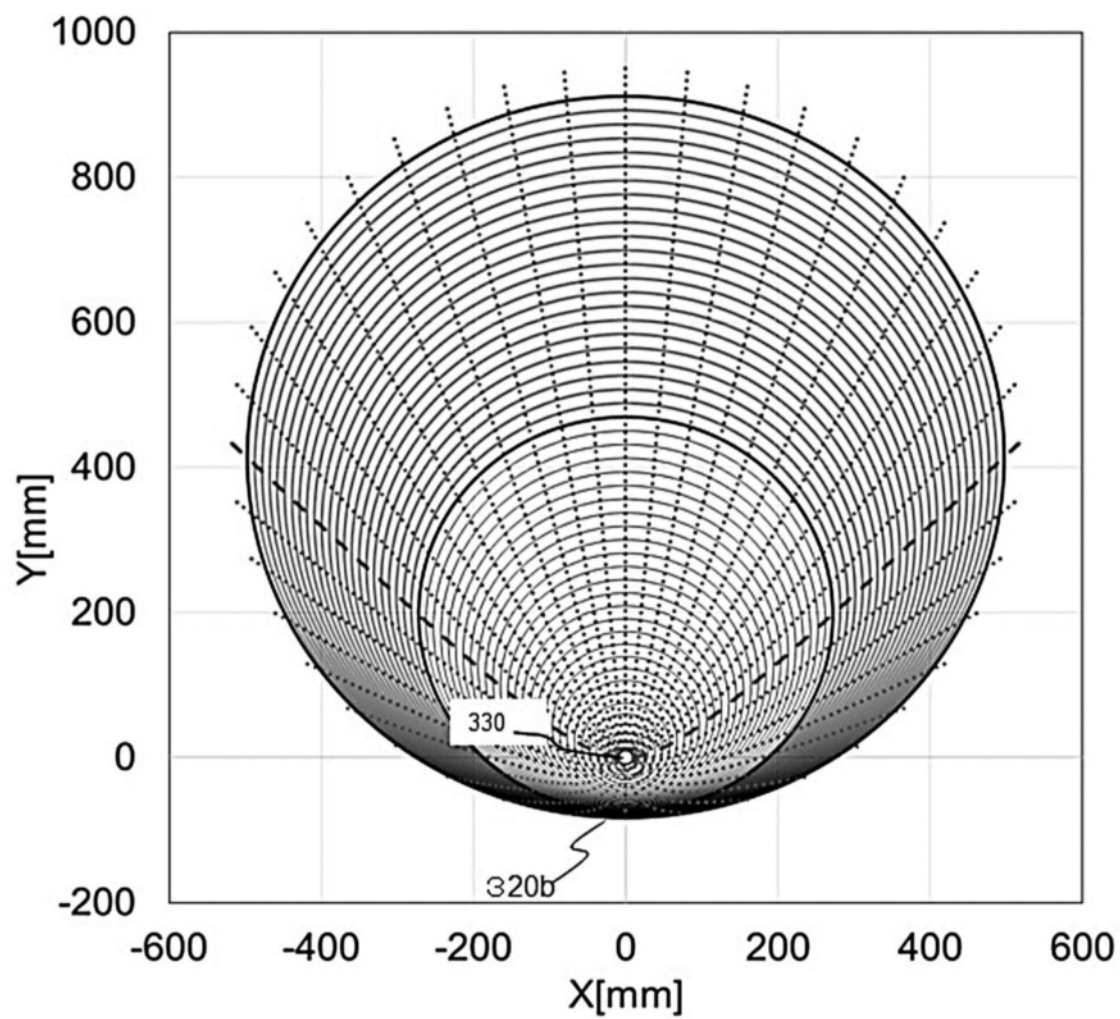


图13

参考技术

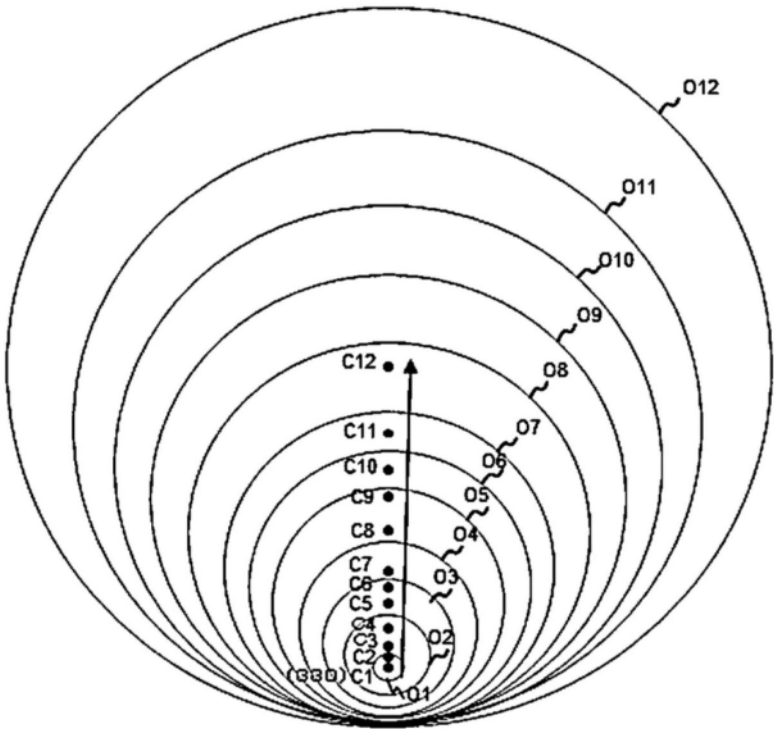


图14