



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110012585 B

(45) 授权公告日 2021.09.14

(21) 申请号 201910406164.7

(22) 申请日 2014.12.08

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110012585 A

(43) 申请公布日 2019.07.12

(62) 分案原申请数据
201480083728.3 2014.12.08

(73) 专利权人 株式会社日立制作所
地址 日本东京都

(72) 发明人 青木孝道 蝦名风太郎 梅泽真澄
原重充 西内秀晶 关孝义

(74) 专利代理机构 北京银龙知识产权代理有限公司 11243
代理人 曾贤伟 范胜杰

(51) Int. Cl.
H05H 13/10 (2006.01)
A61N 5/10 (2006.01)

(56) 对比文件

JP 2002305100 A, 2002.10.18

JP 2014186855 A, 2014.10.02

CN 104010694 A, 2014.08.27

US 2014094639 A1, 2014.04.03

CN 101562938 A, 2009.10.21

CN 102651942 A, 2012.08.29

JP 2000308690 A, 2000.11.07

D. J. CLARK. "A MICROTRON CYCLOTRON - THE "SLIPATRON"". 《Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa》. 1996, 第618-620页.

D. J. CLARK. "A MICROTRON CYCLOTRON - THE "SLIPATRON"". 《Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Cape Town, South Africa》. 1996, 第618-620页.

审查员 吴小云

权利要求书1页 说明书41页 附图39页

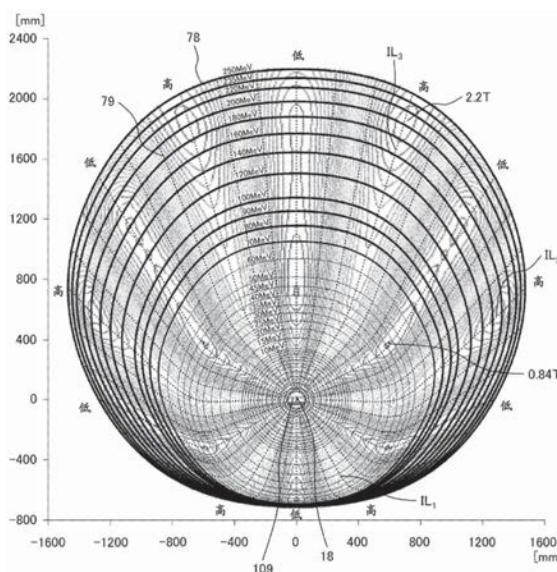
(54) 发明名称

加速器以及粒子束照射装置

(57) 摘要

提供能够高效地出射能量不同的离子束的加速器。加速器具有圆形的真空容器,该真空容器包含圆形的一对相对的旁轭。入射用电极配置在与真空容器的中心轴相比旁轭内的射束出射路径的入口侧。在旁轭内,在入射用电极的周围从入射用电极放射状地配置6个磁铁。在旁轭的周向上与各磁极交替地配置6个凹部。在真空容器内形成以入射用电极为中心的多个射束环绕轨道所存在的轨道同心区域、以及在该区域周边存在从入射用电极偏心的多个射束环绕轨道的轨道偏心区域。在轨道偏心区域,在入射用电极和射束出射路径的入口之间射束环绕轨道变得密集,在以入射用电极为基点与射束出射路径的入口180°相反侧射束环绕轨道相互间的间隔变宽。

CN 110012585 B



1. 一种加速器,其特征在于,具有:

一对铁芯,其相互相向地设置,在该一对铁芯之间形成磁场;

离子入射部,其入射离子束;

加速电极,其对上述离子束进行加速,呈向上述离子入射部而前端变细的形状;以及射束出射路径,其向外部取出上述离子束,

上述离子入射部位于上述铁芯的中心的上述射束出射路径的入口之间,

由上述一对铁芯形成的不同能量的上述离子束各自环绕的环状的多个射束环绕轨道在上述射束出射路径的入口聚集,

在以离子源的入射电极为基点与上述射束出射路径的入口180°相反侧,具有不同能量的各上述离子束的各上述射束环绕轨道彼此的间隔变宽。

2. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

由上述一对铁芯形成的多个环状的射束环绕轨道相互间的间隔在上述射束出射路径与上述离子入射部之间的区域,夹着上述离子入射部且比上述射束出射路径的180°相反侧的区域窄。

3. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

在磁场强度为B,离子束的磁刚性系数为 $B\rho$,磁场的垂直成分为 B_z 以及形成射束环绕轨道的上述一对铁芯之间的轨道面内的相对于上述射束环绕轨道垂直方向的位置坐标为r时,由在上述一对铁芯中的各个铁芯形成的多个磁极形成的环状的上述射束环绕轨道的以射束出射路径的入口的180°相反侧的位置为中心的半圈的通过以下式(1)表示的n值的绝对值的积分值小于上述射束环绕轨道的以上述入口为中心的半圈的上述n值的绝对值的积分值,

$$n = \frac{B\rho}{B^2} \frac{\partial B_z}{\partial r} \dots (1)$$

4. 根据权利要求1所述的加速器,其特征在于,

上述多个射束环绕轨道的中心相互偏心,

上述环状的射束环绕轨道在向轨道面入射上述离子的离子入射部与上述射束出射路径的入口之间变得密集。

5. 一种粒子束照射装置,其特征在于,具备:

权利要求1至4中的任意一项所述的加速器;

输送系统,其输送从上述加速器取出的离子束;以及

照射装置,其向照射对象照射通过上述输送系统输送的不同能量的上述离子束。

6. 根据权利要求5所述的粒子束照射装置,其特征在于,

聚集的上述射束环绕轨道的最小能量为从上述照射装置向照射对象出射的最小能。

加速器以及粒子束照射装置

[0001] 本申请为2014年12月8日递交的、申请号为2014800837283、发明名称为“加速器以及粒子束照射装置”的专利申请的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明涉及一种加速器以及粒子束照射装置,尤其涉及适合用于治疗癌症的加速器以及粒子束照射装置。

背景技术

[0003] 已知粒子束照射装置大致分为作为加速器具有同步加速器的粒子束照射装置(例如,参照日本特开2004-358237号公报)以及作为加速器具有回旋加速器的粒子束照射装置(例如,参照日本特开2011-92424号公报)。

[0004] 具有同步加速器的粒子束照射装置具备离子源、直线加速器、同步加速器、射束输送系统、旋转台架以及照射装置。同步加速器具有环状的射束导管,在射束导管上设有多个偏转电磁铁、多个四极电磁铁、高频加速空腔、出射用高频施加装置以及出射用偏转器。离子源与直线加速器相连接,直线加速器与同步加速器相连接。与同步加速器的出射口相连接的射束输送系统的一部分被设置在旋转台架,与设置在旋转台架的照射装置相连。

[0005] 从离子源出射的离子(例如,阳离子或碳离子)通过直线加速器被加速。由直线加速器生成的离子束入射至同步加速器的环状的射束导管中。在该射束导管内环绕的离子束在施加高频电压的高频加速空腔内被加速至预定能量。通过从出射用高频施加装置的高频施加电极向进行环绕而达到了预定能量的离子束施加高频电压,该离子束经过出射用偏转器出射到射束输送系统。从照射装置向治疗台上的患者的癌症患部照射离子束。另外,旋转台架使照射装置旋转使得照射装置的射束路径与针对患部的离子束的照射方向一致。

[0006] 在离子束的照射方向上将该患部分割成多层,在对每层进行离子束的扫描时,改变离子束的能量来确定要达到的层。如上所述,通过控制向高频加速空腔施加的高频电压模式、四极电磁铁的励磁模式以及偏转电磁铁的励磁模式来调节离子束的能量。通过调节设置在照射装置的操作用磁铁的励磁电流,来控制层内的离子束的扫描。

[0007] 具有回旋加速器的粒子束照射装置具备离子源、回旋加速器、射束输送系统、旋转台架以及照射装置。回旋加速器具有由横截面为圆形的一对相对的铁芯构成的真空容器、高频加速装置以及取出用电磁铁。射束输送系统与配置有取出用电磁铁的回旋加速器的出射口连接。具有回旋加速器的粒子束照射装置中的射束输送系统、旋转台架以及照射装置,实际上与具有同步加速器的粒子束照射装置的这些结构相同。

[0008] 在具有回旋加速器的粒子束照射装置中,从离子源出射的离子(例如,阳离子或碳离子)入射到回旋加速器的铁芯的横截面中心,通过高频加速装置进行加速。加速后的离子束从铁芯的中心向旁侧内侧的侧面螺旋状地环绕,并通过设置在铁芯周边部的取出用电磁铁出射到射束输送系统。该出射的离子束经过射束输送系统从照射装置照射至治疗台上的患者的癌症患部。

[0009] 在使用具有回旋加速器的粒子束照射装置,如上所述将患部分割为多层,对每一层进行离子束扫描的情况下,使用设置在射束输送系统的降能器调节向射束输送系统出射的离子束的能量。降能器是通过厚度不同的金属板单体或多个金属板的组合,调节通过降能器降低后的经过降能器后的离子束的能量,即向患部照射的离子束的能量。通常,通过回旋加速器加速的离子束的能量是固定的,因此通常通过回旋加速器将离子束的能量提高至治疗癌症所需要的最大能量,该能量由于离子束透射设置在降能器的某个金属板而衰减,调节为预定的能量。

[0010] 日本特开2014-160613号公报记载了在该粒子束照射装置中使用的能够提高离子束的引出效率的回旋加速器。该回旋加速器具备:一对磁极,其间隔离子束的环绕轨道而形成,在圆周方向上具有交替配置的多个凸部以及多个凹部,沿着该环绕轨道形成由凸部包夹的小山(hill)区域以及由该凹部包夹的谷(valley)区域;D形电极,其被设置在谷区域;以及加速空腔,在设有D形电极的谷区域以外的至少一个谷区域中,在离子束的环绕轨道的半径方向的外周侧配置该加速空腔。在使离子束加速的D形电极以外设有加速空腔的该回旋加速器中,离子束每1圈的能量增加量增加从而圈距增加,离子束的引出效果提高。

[0011] 日本特开平10-118204号公报记载有将癌症患部在离子束的照射方向上从患者的体表面开始分割为多个层,通过扫描细的离子束对各层内的多个照射位置照射离子束的带电粒子束照射方法。通过控制在照射装置中设置的扫描电磁铁来进行在层内离子束向相邻的照射位置的移动。此外,通过改变离子束能量来进行离子束从深层向浅层的移动。离子束的能量越大,离子束的后述的布拉格峰(Bragg peak)能够到达患部的越深位置。在向患者照射了离子束的情况下,在从患者的体表面开始的深度方向上,表示了日本特开平10-118204号公报的图3所示的剂量分布,在布拉格峰剂量最大,并且,在超过布拉格峰的深度剂量分布急剧减少。在使用离子束进行的癌症治疗中使用在布拉格峰剂量最大,在超过布拉格峰的深度剂量急剧减小的性质。

[0012] 在日本专利第3472657号公报所记载的粒子束照射装置中,将出射离子束的圆形加速器安装在纵向旋转的旋转框上,并设有用于将从加速器出射的离子束导入到治疗室的射束输送腔。射束输送腔与加速器的出射口连接。射束输送腔向加速器的半径方向延伸并向水平方向弯曲从而到达治疗室的正上方,之后,向下弯曲。照射区域形成装置安装在射束输送腔的前端部。在放射线墙内形成有治疗室,将要照射离子束的患者承载在设置于治疗室内的治疗台上。将放射线墙的侧壁配置在加速器和治疗室之间。从圆形加速器出射的离子束经过射束输送腔以及照射区域形成装置后照射至治疗台上的患者的患部。为了改变离子束的照射方向,使旋转框旋转来使加速器旋转,使射束输送腔以及照射区域形成装置围绕加速器的旋转中心旋转,由此来改变照射区域形成装置的朝向。

[0013] 现有技术文献

[0014] 专利文献

[0015] 专利文献1:日本特开2004-358237号公报

[0016] 专利文献2:日本特开2011-92424号公报

[0017] 专利文献3:日本特开2014-160613号公报

[0018] 专利文献4:日本特开平10-118204号公报

[0019] 专利文献5:日本专利第3472657号公报

[0020] 专利文献6:日本特开2006-239403号公报

发明内容

[0021] 发明要解决的课题

[0022] 使用同步加速器的粒子束照射装置能够在同步加速器中生成能量不同的多个离子束,能够改变从同步加速器出射的离子束的能量。然而,需要多个偏转电磁铁以及多个四极电磁铁,因此同步加速器难以实现某种程度以上的小型化。此外,同步加速器间歇性地取出离子束,离子束的取出量少。

[0023] 与此相对,回旋加速器能够连续地取出离子束,离子束的取出量多。然而,在回旋加速器中生成的离子束的能量是固定的,无法取出能量比最大能量低的离子束。因此,如同向患部的某一层照射离子束的情况那样,在需要低能量的离子束时,需要通过设置在射束输送系统的降能器来调节离子束的能量使得离子束到达该层。当在离子束的能量调节中使用降能器时,产生降能器引起的离子束的射束大小增加、透射降能器的金属板的离子数减少以及放射线废弃物增加等问题。

[0024] 因此,希望得到能够连续地实现具有不同能量的离子束的取出,能够提高该离子束的取出效率的质子束治疗装置。

[0025] 本发明的目的在于提供一种能够高效地出射能量不同的各个离子束的加速器以及粒子束照射装置。

[0026] 用于解决课题的方法

[0027] 实现上述目的的本发明的特征在于,具有:两个铁芯,其相互相向地设置,在该两个铁芯之间形成磁场;加速电极,其对离子束进行加速;以及射束出射路径,其向外部取出上述离子束,由在两个铁芯的各个铁芯上形成的多个磁极所形成的不同能量的离子束各自环绕的环状的多个射束环绕轨道在射束出射路径的入口聚集。

[0028] 多个射束环绕轨道在射束出射路径的入口聚集,因此容易使从各个射束环绕轨道脱离的能量不同的各离子束入射到射束出射路径的入口,能够高效地出射能量不同的各离子束。

[0029] 具有:两个铁芯,其相互相向地设置,在该两个铁芯之间形成等时性磁场;以及加速电极,其对离子束进行加速,

[0030] 由磁极形成的多个环状的射束环绕轨道相互间的间隔中的一方比另一方宽,由此也能够实现上述目的。

[0031] 在射束环绕轨道的射束环绕轨道相互间的间隔变宽的位置,能够容易使离子束从射束环绕轨道脱离,且能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道环绕的能量不同的各离子束。

[0032] 具有:环状的主线圈;磁极,其形成磁场;以及加速电极,其对离子束进行加速,由上述磁极形成的环状的射束环绕轨道的中心与主线圈的重心的位置不同,由此也能够实现上述目的。

[0033] 由磁极形成的环状的射束环绕轨道的中心的位置与主线圈的重心的位置不同,因此关于在离子入射部的周围形成的多个环状的射束环绕轨道相邻的相互的间隔,与射束出射路径的入口侧的区域相比,在环状的射束环绕轨道的中心侧的区域变宽。因此,在射束环

绕轨道相邻的相互间隔变宽的射束环绕轨道的中心侧的区域中,容易使离子束从射束环绕轨道脱离,且能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道环绕的能量不同的各离子束。

[0034] 具有:两个铁芯,其相互相向地设置,在该两个铁芯之间形成磁场;加速电极,其对离子束进行加速;以及射束出射路径,其向取出离子束的外部取出离子束,在磁场强度为B,离子束的磁刚性系数为 $B\rho$,磁场的垂直成分为 B_z 以及形成射束环绕轨道的两个铁芯之间的轨道面内的相对于射束环绕轨道垂直方向的位置坐标为r时,由在两个铁芯中的各个铁芯形成的多个磁极形成的环状的射束环绕轨道的以射束出射路径的入口的180°相反侧的位置为中心的半圈的通过以下式(1)表示的n值的绝对值的积分值小于射束环绕轨道的以射束出射路径的入口为中心的半圈的n值的绝对值的积分值,由此也能够实现上述目的。

[0035] [公式1]

$$[0036] \quad n = \frac{B\rho}{B^2} \frac{\partial B_z}{\partial r} \cdots (1)$$

[0037] 环状的射束环绕轨道的以射束出射路径的入口的180°相反侧的位置为中心的半圈的由上述式(1)表示的n值的绝对值的积分值小于射束环绕轨道的以射束出射路径的入口为中心的半圈的n值的绝对值的积分值,因此能够高效地出射能量不同的各离子束。并且,通过那样的结构,射束环绕轨道偏心,在射束出射路径的入口侧不同能量的射束环绕轨道聚集时,能够缓和由于聚集而在射束出射路径的入口侧产生的磁场梯度的倾斜。

[0038] 具有:两个铁芯,其相互相向地设置,在该两个铁芯之间形成磁场;以及加速电极,其对离子束进行加速,在上述铁芯之间形成的上述离子束环绕的轨道面内磁场强度最高的区域形成在与最外周的射束环绕轨道相比的内周侧,由此也能够实现上述目的。

[0039] 在与最外周的射束环绕轨道相比的内周侧形成轨道面内磁场强度最高的区域,因此能够高效地出射能量不同的各离子束。并且,通过那样的结构,在轨道面形成的环状的多个射束轨道中位于外周部的射束环绕轨道上环绕的离子束的稳定性提高。

[0040] 具有:两个铁芯,其相互相向地设置,在该两个铁芯之间形成磁场;加速电极,其对离子束进行加速;以及射束出射路径,其向外部取出上述离子束,沿着射束环绕轨道的磁场强度分布中的3倍高次谐波的磁场成分的基于环绕上述射束环绕轨道的上述离子束的能量的变化率的绝对值,在从轨道同心区域向包围上述轨道同心区域的轨道偏心区域推移时降低,由此也能够实现上述目的。

[0041] 沿射束环绕轨道的磁场强度分布中的3倍高次谐波的磁场成分的基于在该射束环绕轨道环绕的离子束的能量的变化率的绝对值,在从轨道同心区域向包围该轨道同心区域的轨道偏心区域推移时降低,因此能够高效地出射能量不同的各离子束。并且,基于离子束的能量的变化率的绝对值在从轨道同心区域向包围该轨道同心区域的轨道偏心区域推移时降低,因此能够使离子束稳定地加速。

[0042] (A1)在加速器中,供给来自离子源的离子的离子入射部被配置在与主线圈的重心或中心轴在径向上不同的位置,一对铁芯形成在离子入射部的周围从离子入射部放射状地延伸,且前端朝向离子入射部的多个磁极,并且,在离子入射部的周围形成从离子入射部放射状地延伸的多个凹部,在离子入射部的周围交替地配置磁极和凹部,主线圈包围配置在各铁芯内的多个磁极以及多个凹部,以下在该加速中说明更优选的结构。

[0043] (A2) 优选在上述(A1)中,在一对铁芯中,在垂直于主线圈的中心轴的平面中的连接射束出射路径的入口和主线圈的中心轴的直线的两侧的各区域,将高频加速电极配置于在垂直该中心轴的平面内在该直线的两侧分配配置的多个磁极中的在主线圈的周向上相邻的磁极之间,

[0044] 高频加速电极的前端与离子入射部相对,高频加速电极具有弯曲点,

[0045] 高频加速电极的从弯曲点到高频加速电极的与主线圈相对的端面为止的部分为在主线圈的周向上相邻的磁极之间存在的1个凹部,向存在于与射束出射路径的入口180°相反侧的第1凹部弯曲。

[0046] (A3) 优选,在上述(A1)中,配置于上述第1凹部的射束电流测定装置在形成在一对铁芯间的射束环绕区域内形成射束环绕轨道的、垂直于主线圈的中心轴的轨道面内,具有配置于上述第1凹部的射束电流测定部、使射束电流测定部在轨道面内在主线圈的半径方向上移动的移动装置、检测移动的射束电流测定部在轨道面内的位置的位置检测装置。

[0047] (A4) 优选,在上述(A1)中,优选具有第1控制装置(例如,线圈电流控制装置),其在通过配置于上述第1凹部的射束电流测定装置测定的射束环绕轨道的位置不位于预定位置时,对分别向安装于多个磁极的调整线圈供给的励磁电流进行控制。

[0048] (B1) 以下,说明在主线圈的半径方向的多个位置,具备使离子束从射束环绕轨道脱离的射束脱离装置的加速器中更优选的结构。

[0049] (B2) 优选,在上述(B1)中,加速器具备隔着形成离子束环绕的射束环绕轨道的射束环绕区域彼此结合的一对铁芯、分别配置于一对铁芯内的主线圈、贯穿铁芯的离子束的出射口即射束路径,被供给来自离子源的离子而形成在射束环绕区域的离子入射部被配置在与主线圈的中心在径方向上不同的位置。

[0050] (B3) 优选,在上述(B2)中,一对铁芯上分别形成有多个磁极以及多个凹部,以包围离子入射部的方式交替地配置磁极和凹部,射束脱离装置即偏转电磁铁装置面向离子入射部地被配置于1个凹部内。

[0051] (B4) 优选,在上述(B3)中,偏转电磁铁装置被配置在以离子入射部为基点位于与射束出射路径的入口180°相反侧的1个凹部即第1凹部。

[0052] (B5) 优选,在上述(B4)中,设置使偏转电磁铁装置移动的移动装置。

[0053] (B6) 优选,在上述(B3)中,在配置有偏转电磁铁装置的凹部配置的射束电流测定装置在一对铁芯间形成的射束环绕区域内形成射束环绕轨道的垂直于主线圈的中心轴的轨道面内具有配置于上述凹部的射束电流测定部、使射束电流测定部在轨道面内在主线圈的半径方向上移动的移动装置,检测移动的射束电流测定部在轨道面内的位置的位置检测装置。

[0054] (B7) 以下,说明在具备上述(B2)的加速器、以及输出要从该加速器出射的上述离子束的照射装置的粒子束照射装置中更优选的结构。

[0055] (B8) 优选,在上述(B7)中,具备:旋转装置,其使照射装置旋转;第1控制装置(例如,旋转控制装置),其为了将照射装置的射束轴设定于向射束照射对象的离子束的照射方向,而对旋转装置的旋转进行控制;第2控制装置(例如,无质量切割板控制装置),其为了向射束照射对象的在该照射方向上分割的多个层中的某层照射具有到达该层的能量的离子束,对移动装置进行控制,而将偏转电磁铁装置的相对的应励磁的一对磁极定位于具有该

能量的离子束环绕的射束环绕轨道,对电源进行控制来对应励磁的一对磁极进行励磁。

[0056] (C1) 以下,说明由在一对铁芯的各铁芯形成的多个磁极形成的不同能量的离子束各自环绕的环状的多个射束环绕轨道在射束出射路径的入口聚集的加速器中,更优选的结构。

[0057] (C2) 在上述(C1)的加速器中,在离子入射部的周围形成轨道偏心区域,在该轨道偏心区域中,形成中心彼此偏心的多个环状的射束环绕轨道,这些环状的射束环绕轨道在离子入射部和射束路径的入口之间,在射束出射路径的入口聚集,在以离子入射部为基点与射束路径入口 180° 相反侧环状的射束环绕轨道彼此的间隔变宽。

[0058] (C3) 在上述(C2)的加速器中,形成轨道同心区域,该轨道同心区域形成以离子入射部为中心的同心多个环状的射束环绕轨道,上述轨道偏心区域包围轨道同心区域。

[0059] 发明效果

[0060] 根据本发明,能够从加速器高效地出射能量不同的各离子束。

附图说明

[0061] 图1是作为本发明的优选的一实施例的实施例1的粒子束照射装置的结构图。

[0062] 图2是在图1所示的粒子束照射装置中所使用的加速器的立体图。

[0063] 图3是图2所示的加速器的横截面图(图5及图6的II-II截面图)。

[0064] 图4是图2所示的加速器的入射用电极附近的放大图。

[0065] 图5是图2的V-V截面图。

[0066] 图6是图2的VI-VI截面图。

[0067] 图7是图2所示的无质量切割板的侧视图。

[0068] 图8是图7的各个VIII-VIII方向的标记图。

[0069] 图9是图1所示的控制系统的详细结构图。

[0070] 图10是在图2所示的加速器内形成的多个离子束的轨道、等时性线以及磁场分布的说明图。

[0071] 图11是表示沿图3及图10所示的等时性线 IL_1 的磁极8E与中间面之间的间隙变化的说明图。

[0072] 图12是表示沿图3及图10所示的等时性线 IL_2 的磁极8E与中间面之间的间隙变化的说明图。

[0073] 图13是表示沿图3及图10所示的等时性线 IL_3 的磁极8E与中间面之间的间隙变化的说明图。

[0074] 图14是表示改变了离子束的能量时的离子束的行进方向上的距离与磁场强度之间的关系特性图。

[0075] 图15是表示改变了离子束的能量时的离子束的行进方向上的距离与n值之间的关系特性图。

[0076] 图16是表示基于离子束的动能的1倍调制波、2倍调制波以及3倍调制波的变化特性图。

[0077] 图17是表示基于离子束的动能的水平方向以及垂直方向上的各个自由振荡数的变化特性图。

[0078] 图18是表示改变了离子束的能量时的离子束的行进方向上的距离与水平 β 函数之间的关系特性图。

[0079] 图19是表示改变了离子束的能量时的离子束的行进方向上的距离与垂直 β 函数之间的关系特性图。

[0080] 图20是表示与离子束的动能对应的要进行出射的离子束的射出量的说明图。

[0081] 图21是关于通过无质量切割板射出的离子束到达取出位置为止的轨道,表示离子束的行进方向的距离与离子束的水平方向的位移之间的关系特性图。

[0082] 图22是表示图7所示的无质量切割板的相向的一对磁极的励磁的说明图。

[0083] 图23是表示使用图1所示的粒子束照射装置的粒子束照射方法中的从离子向加速器的入射开始直到从加速器取出离子束为止的顺序的流程图。

[0084] 图24是表示真空容器的半径方向上的位置与离子束的量(射束电流)之间的关系说明图。

[0085] 图25是表示运行中的粒子束照射装置的加速器中各状态量的变化的说明图。

[0086] 图26是表示使用图1所示的粒子束照射装置的粒子束照射方法中的向患者的患部照射离子束的顺序的流程图。

[0087] 图27是表示在作为本发明的另一优选实施例的实施例2的粒子束照射装置的加速器内形成的射束环绕轨道的说明图。

[0088] 图28是作为本发明的另一优选实施例的实施例3的粒子束照射装置的结构图。

[0089] 图29是作为本发明的另一优选实施例的实施例4的粒子束照射装置的结构图。

[0090] 图30是图29所示的加速器的详细横截面图。

[0091] 图31是图29所示的控制系统的详细结构图。

[0092] 图32是表示使用图29所示的粒子束照射装置的粒子束照射方法中的向患者的患部照射离子束的顺序的流程图。

[0093] 图33是作为本发明的另一优选实施例的实施例5的粒子束照射装置的结构图。

[0094] 图34是图33所示的加速器的详细横截面图。

[0095] 图35是表示使用图33所示的粒子束照射装置的粒子束照射方法中的向患者的患部照射离子束的顺序的流程图。

[0096] 图36是作为本发明的另一优选实施例的实施例6的粒子束照射装置的结构图。

[0097] 图37是图36所示的加速器的详细横截面图(图38的B-B截面图)。

[0098] 图38是图37的A-A截面图。

[0099] 图39是图38所示的无质量切割板附近的放大图。

[0100] 图40是图39所示的射束电流测定装置的侧视图。

[0101] 图41是图40的D-D方向的标记图。

[0102] 图42是作为本发明的另一优选实施例的实施例7的粒子束照射装置的结构图。

[0103] 图43是图42所示的加速器的详细横截面图。

[0104] 图44是作为本发明的另一优选实施例的实施例8的粒子束照射装置的真空容器附近的横截面图(图45以及图46的G-G截面图)。

[0105] 图45是图44的E-E截面图。

[0106] 图46是图44的F-F截面图。

[0107] 图47是表示无质量切割板的另一配置例的说明图。

[0108] 图48是作为本发明的另一优选实施例的实施例9的粒子束照射装置的横截面图。

具体实施方式

[0109] 发明人为了实现一种像回旋加速器那样能够连续取出离子束,并且像同步加速器那样能够取出能量不同的离子束的加速器,进行了各种研究。

[0110] 发明人首先着眼于,使在回旋加速器的真空容器内环绕的离子束的射束环绕轨道的相互间隔(真空容器的半径方向上的射束环绕轨道相互的间隔)变宽。使该射束环绕轨道的间隔变宽,即,使射束环绕轨道相互间的间隔(圈距:turn separation)变大是指真空容器的直径变大,回旋加速器变得大型化。这与加速器的小型化相反。此外,在现有的回旋加速器中,在真空容器内描绘了同心圆状的射束环绕轨道,难以确保高能量下的圈距,因此难以高效地出射能量不同的各离子束。

[0111] 在回旋加速器中,使用圆形的真空容器,并将离子源与真空容器的中心相连使得在该真空容器的中心入射离子。发明人考虑了如下情况:在回旋加速器中,将与真空容器的中心相连接的离子源移动到在真空容器形成的射束取出口侧来与真空容器连接,使来自离子源的离子不是在真空容器的中心而是在偏离至射束取出口侧的位置入射到真空容器内。结果,在从离子源入射离子的离子入射位置与射束取出口之间,在真空容器内形成的射束环绕轨道相互的间隔变得密集,在与真空容器的射束取出口180°相反一侧的位置与该离子入射位置之间,与离子入射位置与射束取出口之间相反,能够使在真空容器内形成的射束环绕轨道相互后的间隔变宽。

[0112] 发明人通过应用这样的射束环绕轨道的思路,创造出能够高效地出射能量不同的各离子束的新的加速器。

[0113] 以下,使用附图对应用了以上所述的发明人新创造出的加速器的本发明的各实施例进行说明。

[0114] 实施例1

[0115] 以下,使用图1~图8对本发明的优选的一实施例即实施例1的粒子束照射装置进行说明。

[0116] 将本实施例的粒子束照射装置1配置在建筑物(未图示)内,并设置在建筑物的地面上。该粒子束照射装置1具有离子束产生装置2、射束输送系统13、旋转台架6、照射装置7和控制系统65。离子束产生装置2具有离子源3以及与离子源3连接的加速器4。在本实施例中所使用的加速器4为能量可变连续波加速器。

[0117] 射束输送系统13具有到达照射装置7的射束路径(射束导管)48,在该射束路径48上,从加速器4向照射装置7按照多个四极电磁铁46、偏转电磁铁41、多个四极电磁铁47、偏转电磁铁42、四极电磁铁49、50以及偏转电磁铁43、44这样的顺序进行了配置而构成。射束输送系统13的射束路径48的一部分被设置在旋转台架6,偏转电磁铁42、四极电磁铁49、50以及偏转电磁铁43、44也被设置在旋转台架6。射束路径48与在取出用切割电磁铁19形成的射束出射路径20(参照图2)连接,该取出用切割电磁铁19被设置在加速器4上。旋转台架6是以旋转轴45为中心旋转,使照射装置7绕旋转轴45旋转的旋转装置。

[0118] 照射装置7具备2台扫描电磁铁(离子束扫描装置)51、52;射束位置监视器53以及

剂量监视器54。沿着照射装置7的中心轴,即沿着射束轴配置了扫描电磁铁51、52;射束位置监视器53以及剂量监视器54。扫描电磁铁51、52;射束位置监视器53以及剂量监视器54被配置在照射装置7的壳体(未图示)内,射束位置监视器53以及剂量监视器54被配置在扫描电磁铁51、52的下游。扫描电磁铁51使离子束在与照射装置7的中心轴垂直的平面内偏转在y方向上进行扫描,扫描电磁铁52使离子束在该平面内偏转在与y方向正交的x方向上进行扫描。照射装置7被安装在旋转台架6上,被配置在偏转电磁铁44的下游。患者56躺卧的治疗台55被配置成与照射装置7相对。

[0119] 控制系统65具有中央控制装置66、加速器/输送系统控制装置69、扫描控制装置70、旋转控制装置88以及数据库72。中央控制装置66具有中央运算装置(CPU)67以及与CPU67连接的存储器68。加速器/输送系统控制装置69、扫描控制装置70、旋转控制装置88以及数据库72与CPU67连接。带电粒子束照射系统1具有治疗计划装置73,治疗计划装置73与数据库72相连接。

[0120] 使用图9对控制系统65进行详细说明。加速器/输送系统控制装置69包括入射用电极控制装置83、射束电流测定部控制装置84、电磁铁控制装置85、无质量切割板控制装置86、线圈电流控制装置94、高频电压控制装置99以及存储器107。扫描控制装置70包括离子束确认装置87、照射位置控制装置89、剂量判定装置91、层判定装置92以及存储器70。CPU67与入射用电极控制装置83、射束电流测定部控制装置84、电磁铁控制装置85、无质量切割板控制装置86、线圈电流控制装置94、高频电压控制装置99、存储器107、离子束确认装置87、照射位置控制装置89、剂量判定装置91、层判定装置92以及存储器70连接。照射位置控制装置89与入射用电极控制装置83、电磁铁控制装置85以及无质量切割板控制装置86连接,剂量判定装置91与入射用电极控制装置83连接。层判定装置92与照射位置控制装置89连接。存储器107分别与入射用电极控制装置83、射束电流测定部控制装置84、电磁铁控制装置85以及无质量切割板控制装置86连接,存储器70分别与照射位置控制装置89、剂量判定装置91以及层判定装置92连接。

[0121] 接着,使用图3、图4、图5以及图6对加速器4的详细结构进行说明。加速器4具有圆形的真空容器27,该真空容器27包括相互相对的圆形的铁芯14A以及14B。如后所述,铁芯14A以及14B结合而形成真空容器27,并形成加速器4的外壳。铁芯14A包括旁轭5A以及磁极7A~7F,铁芯14B包括旁轭5B以及磁极7A~7F。以后对各磁极7A~7F的具体结构进行叙述。旁轭5A具有圆形的且有预定厚度的底座部74A以及从底座部74A的一面向与该一面垂直的方向延伸的筒状部(例如圆筒部)75A,旁轭5B具有底座部74B以及从底座部74B的一面向与该一面垂直的方向延伸的筒状部(例如圆筒部)75B(参照图5及图6)。底座部74A将筒状部75A的一端部封闭,因此旁轭5A的另一端部开放。底座部74B将筒状部75B的一端部封闭,因此旁轭5B的另一端部开放。构成真空容器27的铁芯14A和铁芯14B的接触面即筒状部75A与筒状部75B的接触面被密封。

[0122] 铁芯14A以及14B,具体地说,旁轭5A以及5B如图5和图6所示使各自的开放的部分彼此相对,在使筒状部75A与筒状部75B相对的状态下彼此结合从而构成真空容器27。在本实施例中,为了将真空容器27设置在上述建筑物的地面上,使旁轭5B位于下方来设置在该地面上,旁轭5A放置在旁轭5B之上(参照图6)。在本实施例中,筒状部75A、75B形成各旁轭5A、5B的侧壁,成为真空容器27的侧壁。与配置在铁芯14A外侧的离子源3相连接的离子入射

管3A被安装在旁轭5A的底座部74A,并贯穿底座部74A。

[0123] 在旁轭5A与旁轭5B接触的位置在真空容器27内形成的由一点划线所示的面为中间面(media plane)77(参照图5和图6),是在真空容器27内离子束被加速而进行环绕的面。此外,如后所述,在中间面77形成具有不同能量的各离子束环绕的射束环绕轨道。实际上,离子束一边在与中间面77垂直的方向(真空容器27的中心轴C)上进行自由振荡(betatron oscillation)一边进行环绕,因此离子束在与中间面77垂直的方向上具有某种宽度的射束环绕区域76(参照图5和图6)内进行环绕。真空容器27的中心轴C也是铁芯14A、14B的中心轴。

[0124] 吸引管26被配置在离子入射管3A的中心轴的延长线上并贯穿底座部74B,且被安装在底座部74B上。安装在底座部74B的外表面的真空泵25与吸引管26连接。吸引管26向射束环绕区域76开口。

[0125] 并且,加速器4具有磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F、高频加速电极9A、9B、9C和9D、环状线圈11A和11B、无质量切割板12、射束电流测定部15、入射用电极18以及取出用的上述切割电磁铁19。

[0126] 在旁轭5B的筒状部75B的内侧,沿筒状部75B的内面配置环状线圈(优选圆形线圈)(参照图3、图5和图6)。与环状线圈11B连接的2条引出配线22贯穿筒状部75B并到达真空容器27的外部。与环状线圈11B同样地,在旁轭5A的筒状部75A的内侧,沿筒状部75A的内面配置环状线圈11A(参照图5和图6)。与环状线圈11B同样地,环状线圈11A也连接2条引出配线(未图示),这些引出配线贯穿筒状部75A到达真空容器27的外部。真空容器27的中心轴C是各环状线圈11A、11B的中心轴。环状线圈11A、11B的各自的重心位于中心轴C上。环状线圈11A、11B为环状的主线圈。

[0127] 弯曲的切割电磁铁19分别贯穿筒状部75A以及75B,被安装在旁轭5B的筒状部75B上。切割电磁铁19的位于真空容器27内的一端与环状线圈11A、11B相比位于内侧。切割电磁铁19形成了射束出射路径20。切割电磁铁19的一端以及作为射束出射路径20一端的入口分别位于真空容器27内,在环状线圈11A、11B的内侧位于它们的内部附近。在真空容器27的中心轴C的方向上,在环状线圈11A与环状线圈11B之间配置切割电磁铁19。

[0128] 在各个铁芯14A、14B形成磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F。在铁芯14A形成的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F分别从旁轭5A的底座部74A向筒状部75A所延伸的方向突出。在铁芯14B形成的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F,分别从旁轭5B的底座部74B向筒状部75B所延伸的方向突出(参照图6)。高频加速电极9A、9B、9C和9D经由各个波导管10A~10D,分别安装在旁轭5A和5B的筒状部75A和75B。在旁轭5B设置的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F以及高频加速电极9A、9B、9C和9D分别被配置在环状线圈11B的内侧(参照图3)。与在旁轭5B设置的磁极以及高频加速电极同样地,在旁轭5A设置的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F以及高频加速电极9A、9B、9C和9D分别被配置在环状线圈11A的内侧。

[0129] 使用图3对旁轭5B中的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F以及高频加速电极9A、9B、9C和9D的各自的详细配置进行说明。相对于中间面77,旁轭5A中的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F各自的形状以及配置与旁轭5B中的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F各自的形状以及配置对称,并且,相对于中间面77,旁轭5A中的高频加速电极9A、9B、9C和9D各自的形状以及配置与旁轭5B中的高频加速电极9A、9B、9C和9D各自的形状以及配置对称。因此,省略旁轭5A内的各磁极以

及各高频加速电极的说明。

[0130] 在旁轭5B的底座部74B形成的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F是从底座部74B突出的凸部(参照图6)。

[0131] 在旁轭5B,在旁轭5B的周向上交替地配置各磁极7A~7F和各凹部29A~29F。即,在磁极7A和磁极7B之间形成凹部29A(第1凹部),在磁极7B和磁极7D之间形成凹部29B,在磁极7A和磁极7C之间形成凹部29F(参照图3、图4以及图6)。并且,在旁轭5B,在磁极7D和磁极7F之间形成凹部29C,在磁极7F和磁极7E之间形成凹部29D(第2凹部),在磁极7E和磁极7C之间形成凹部29E(参照图3、图4以及图5)。在旁轭5B,在各磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F与筒状部75B之间形成配置环状线圈11B的凹部29G(参照图3和图6)。

[0132] 离子入射管3A的前端部被在旁轭5A的底座部74A形成的各磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F各自的前端包围。入射用电极18被安装在离子入射管3A的前端,在横穿中间面77的状态下被配置在射束环绕区域76。离子入射管3A的前端与射束环绕区域76连接。在离子入射管3A的前端形成的离子入射口即离子注入口以及入射用电极18被配置在连结环状线圈11A、11B的中心轴C与射束出射路径20的入口的一点划线X上,从环状线圈11A、11B的中心轴C向射束出射路径20的入口侧偏离地配置。即,该离子注入口以及入射用电极18被配置在与该中心轴C不同的位置,被配置在与各环状线圈11A、11B的重心不同的位置。离子注入口以及入射用电极18被配置在与铁芯14A、14B的中心轴C不同的位置。离子注入口是向射束环绕区域76入射离子的离子入射口。并且,接受来自离子注入口的离子的离子入射部109(参照图10)是在最内侧的射束环绕轨道的内侧形成的区域,具体地说,在入射用电极18的周围在射束环绕区域76内形成。

[0133] 沿一点划线X在一条直线上配置凹部29D(第2凹部)以及凹部29A(第1凹部),该凹部29D位于入射用电极18与射束出射路径20的入口之间,凹部29A位于以入射用电极18为基点与射束出射路径20的入口180°相反的一侧。

[0134] 本实施例的加速器为了对沿着射束环绕轨道的磁场分布施加强弱而得到强收敛,在相对的铁芯上形成了多个凸部(磁极)。以下,在与圆形铁芯的中心不同的轨道平面上的位置设置了离子入射点的本实施例的加速器中,针对凸部(磁极)形状进行说明,该凸部用于得到形成偏心的射束环绕轨道的磁场分布。另外,适于形成偏心的射束环绕轨道的铁芯及其凸部(磁极)形状根据进行加速的离子粒子的质量、电荷等而不同,不限于图示的形状。在附图以及以下说明的磁极形状为将本发明应用于质子时的一例。铁芯的中心位于铁芯的中心轴上。

[0135] 在旁轭5B的底座部74A形成的磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F在水平方向(与中心轴C垂直的方向)上,以离子注入口即入射用电极18的位置为中心放射状地配置。这些各个磁极在环状线圈11B的周向上的宽度向着入射用电极18而减少。这些磁极的前端分别是尖的,尖的各前端与入射用电极18相对。磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F各自的在环状线圈11B的周向上的宽度,在各个磁极的与环状线圈11B相对的部分成为最大。

[0136] 磁极7A在相对的2个侧面上形成的弯曲点24A、24B弯曲,磁极7B在相对的2个侧面上形成的弯曲点24C、24D弯曲,磁极7C在相对的2个侧面上形成的弯曲点24E、24F弯曲(参照图4)。此外,磁极7D在相对的2个侧面上形成的弯曲点24G、24H弯曲,磁极7E在相对的2个侧面上形成的弯曲点24I、24J弯曲,磁极7F在相对的2个侧面上形成的弯曲点24K、24L弯曲(参

照图4)。

[0137] 各个磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F的在弯曲点与环状线圈11B所相对的端面之间的部分向凹部29A侧弯曲。即,各个磁极7A、7C和7E的在弯曲点与环状线圈11B所相对的端面之间的部分,在离子束环绕的方向上,向凹部29A侧弯曲。各个磁极7B、7D和7F的在弯曲点与环状线圈11B所相对的端面之间的部分,在与离子束环绕的方向相反的方向上,向凹部29A侧弯曲。磁极7A、7B的各弯曲部分的弯曲角度的绝对值相同。磁极7C、7D的各弯曲部分的弯曲角度的绝对值相同,磁极7E、7F的各弯曲部分的弯曲角度的绝对值相同。各磁极的弯曲角度的绝对值按照磁极7A、磁极7C及磁极7E的顺序增大。磁极7E、7F的弯曲角度的绝对值最大。

[0138] 在水平方向上,以入射用电极18为中心每60°配置磁极7A的弯曲点24A、24B与前端之间的部分;磁极7B的弯曲点24C、24D与前端之间的部分;磁极7C的弯曲点24E、24F与前端之间的部分;磁极7D的弯曲点24G、24H与前端之间的部分;磁极7E的弯曲点24I、24J与前端之间的部分;以及磁极7F的弯曲点24K、24L与前端之间的部分。

[0139] 在本实施例中,如后所述,形成以入射用电极18(离子入射管3A的离子注入口)为中心的轨道同心区域以及包围该轨道同心区域的轨道偏心区域。在各个磁极7A~7F的弯曲点的内侧的一定区域中形成轨道同心区域。由此,各磁极的弯曲点的内侧的形状具有与6个扇形的径向扇AVF回旋加速器类似的形状。在轨道同心区域,在轨道同心区域内形成的各个环状射束环绕轨道的中心按照能量不同的离子束所环绕的每个环状射束环绕轨道而不变。也就是说,以在射束环绕轨道的周期中的预定定时,或者,在相对于射束环绕轨道的中心放射状设置了磁极的预定的环绕角度之间,得到磁场的强弱即得到射束的收敛以及发散的方式形成了这些磁极。

[0140] 相对于一点划线X,磁极7A和磁极7B、磁极7C和磁极7D、磁极7E和磁极7F、凹部29F和凹部29B、凹部29E和凹部29C分别具有对称的形状。此外,在各铁芯14A、14B形成的6个磁极(凸部)7A~7F中的磁极7A、7C和7E被设置成相对于连结环状线圈的中心轴C与射束出射路径20的入口的直线,与磁极7B、7D和7F线对称。同时,本实施例所示的磁极形状没有被设置成相对于圆形铁芯的中心,或相对于环状线圈的重心,或相对于离子入射点,作为全体旋转对称。其理由在于,即使对于每个能量该射束环绕轨道的中心逐渐位移,在各射束环绕轨道周期中的预定定时,或者作为结果相对于各个射束环绕轨道的中心大致相同的环绕角度,得到磁场的强弱即得到射束的收敛以及发散。因此,将磁极形状设置为相对于射束环绕轨道的中心偏移的方向为线对称,向着中心偏移的反方向倾斜,即为非旋转对称的形状。在这样的磁极形状中,全体6个磁极部分的重心从铁芯的中心向射束环绕轨道的中心偏移的反方向位移,因此铁芯的中心和全体6个磁极部分的重心位于不同的水平面上的坐标。后面将使用图10对于磁极形状与射束环绕轨道之间的关联性进行详细说明。

[0141] 调整线圈8A被设置在磁极7A,引出配线21A、21B与调整线圈8A的两端连接。调整线圈8B被设置在磁极7B,引出配线21C、21D与调整线圈8B的两端连接。调整线圈8C被设置在磁极7C,引出配线21E、21F与调整线圈8C的两端连接。调整线圈8D被设置在磁极7D,引出配线21G、21H与调整线圈8D的两端连接。调整线圈8E被设置在磁极7E,引出配线21I、21J与调整线圈8E的两端连接。调整线圈8F被设置在磁极7F,引出配线21L、21K与调整线圈8F的两端连接。各引出配线21A~21K经过环状线圈11A与环状线圈11B之间而贯穿筒状部75B,并被引出到真空容器27的外部。

[0142] 为了在中间面77生成等时性磁场,根据想要在此产生的磁场而在各磁极7A~7F设置各调整线圈8A~8F,因此所设置的调整线圈的间隔并不是固定的。在各磁极7A~7F,与入射用电极18侧相比越靠近环状线圈的内面,所设置的调整线圈的间隔越窄。并且,在磁极7A、7C和7E,按照磁极7A、7C和7E的顺序所设置的调整线圈的间隔变窄。在磁极7B、7D和7F,按照磁极7B、7D和7F的顺序所设置的调整线圈的间隔变窄。在射束出射路径20的入口附近,在环状线圈的半径方向的狭窄范围内宽度广的能量射束环绕轨道78进行聚集,因此在与射束出射路径20的入口相邻的磁极7E和7F,关于所设置的调整线圈的间隔,为了对应于所需要的急剧的该半径的磁场梯度以及高能量的射束环绕轨道而在它们的外周部变窄。

[0143] 使用图3和图6,对旁轭5B内的高频加速电极9A、9B、9C和9D的配置进行说明。

[0144] 高频加速电极9A被配置在磁极7A和磁极7C之间的凹部29F内,与波导管10A连接。高频加速电极9A在凹部29F内被配置在弯曲点24B以及24E与环状线圈11B之间。高频加速电极9B被配置在磁极7B和磁极7D之间的凹部29B内,与波导管10B连接。高频加速电极9B在凹部29B内被配置在弯曲点24D和24G与环状线圈11B之间。高频加速电极9A和9B也可以使离子注入口侧的端面位于各个高频加速电极9A和9B的弯曲点与离子注入口之间的中间点。波导管10A和10B经过环状线圈11A和环状线圈11B之间而贯穿筒状部75B,被引出到真空容器27的外部。在高频加速电极9A、9B中,环状线圈11B的周向上的宽度从入射用电极18向环状线圈11B增大。

[0145] 高频加速电极9C被配置在磁极7C和磁极7E之间的凹部29E内,与波导管10C连接。高频加速电极9C在形成在两个侧面的弯曲点24M和24N(参照图4)弯曲。高频加速电极9C的在弯曲点24M和24N与环状线圈11B所相对的端面之间的部分在离子束环绕的方向上,向凹部29A(第1凹部)侧弯曲。高频加速电极9C的在环状线圈11B的周向上的宽度从各弯曲点24M和24N的弯曲的位置向前端减少,从这些弯曲点向与环状线圈11B相对的端面增加。高频加速电极9D被配置在磁极7D和磁极7F之间的凹部29C内,与波导管10D连接。高频加速电极9D在形成在两个侧面的弯曲点24O和24P(参照图4)弯曲。高频加速电极9D的在弯曲点24O和24P与环状线圈11B所相对的端面之间的部分在与离子束环绕的方向相反的方向上,向凹部29A(第1凹部)侧弯曲。高频加速电极9D的在环状线圈11B的周向上的宽度从各弯曲点24O和24P的弯曲的位置向前端减少,从这些弯曲点向与环状线圈11B相对的端面增加。波导管10C、10D经过环状线圈11A和环状线圈11B之间而贯穿筒状部75B,被引出到真空容器27的外部。各高频加速电极9C和9D的前端位于入射用电极18侧,在设有入射用电极18的离子入射区域相互连接。入射用电极18面向高频加速电极9C与高频加速电极9D的连接部,在从该连接部离开的状态下配置在射束环绕区域76内。

[0146] 沿着经过真空容器27的中心轴C的一点划线X配置凹部29A、入射用电极18和凹部29D。

[0147] 在旁轭5A的底座部74A形成的各磁极7A~7F,如图6所示,是从筒状部75A突出的凸部。在旁轭5A,也与旁轭5B同样地,在各磁极7A、7B、7C、7D、7E和7F与筒状部75A之间形成用于配置环状线圈11A的凹部29G(参照图6)。

[0148] 在旁轭5A与旁轭5B相对地彼此结合的状态下,磁极7A彼此、磁极7B彼此、磁极7C彼此、磁极7D彼此、磁极7E彼此以及磁极7F彼此相互相对。在旁轭5A和旁轭5B这样结合的状态下,凹部29A彼此、凹部29B彼此、凹部29C彼此、凹部29D彼此、凹部29E彼此以及凹部29F彼此

也相互相对。

[0149] 此外,相对于中间面77,在各旁轭5A和5B形成的磁极7A彼此、磁极7B彼此、磁极7C彼此、磁极7D彼此、磁极7E彼此以及磁极7F彼此,并且,在各旁轭5A和5B形成的凹部29A彼此、凹部29B彼此、凹部29C彼此、凹部29D彼此、凹部29E彼此以及凹部29F彼此分别具有对称的形状。

[0150] 在旁轭5A形成的凹部29A的底面95和在旁轭5B形成的凹部29A的底面95,如图5所示,在离子入射管3A的位置彼此最接近。在真空容器27中,这些底面95以入射用电极18为基点在与射束出射路径20的入口180°相反侧,具体地说向着在凹部29A配置的无质量切割板12成为倾斜面,这些底面95之间的中心轴C方向的宽度也从离子入射管3A向无质量切割板12逐渐变宽。在配置了无质量切割板12的位置,在旁轭5A形成的凹部29A的底面95与在旁轭5B形成的凹部29A的底面95之间的宽度在形成在这些底面95之间的宽度内成为最宽。

[0151] 在旁轭5A形成的凹部29D的底面95和在旁轭5B形成的凹部29D的底面95,如图5所示,在离子入射管3A的位置彼此最接近。在真空容器27中,这些底面95从离子入射管3A的位置向切割电磁铁19成为倾斜面,这些底面95之间的中心轴C方向的宽度也从离子入射管3A向切割电磁铁19逐渐变宽。在旁轭5A形成的凹部29D的配置环状线圈11A的部分的底面95与在旁轭5B形成的凹部29D的配置环状线圈11A的部分的底面95之间的宽度,与在旁轭5A形成的凹部29A的配置无质量切割板12的部分的底面95与在旁轭5B形成的凹部29A的配置无质量切割板12的部分的底面95之间的宽度相同。

[0152] 在铁芯14A中,磁极7A~7F、底座部74A以及筒状部75A成为一体地构成铁芯14A。在铁芯14B中,磁极7A~7F、底座部74B以及筒状部75B成为一体地构成铁芯14B。

[0153] 如图6所示,在旁轭5A的磁极7A和与之相对的旁轭5B的磁极7A之间形成间隙28A,在真空容器27的轴向上相对的磁极7B之间形成上述的间隙28B,在旁轭5A的磁极7C和与之相对的旁轭5B的磁极7C之间形成间隙28C,并且,在旁轭5A的磁极7D和与之相对的旁轭5B的磁极7D之间形成间隙28D。虽然未图示,但在旁轭5A的磁极7E和与之相对的旁轭5B的磁极7E之间、以及在旁轭5A的磁极7F和与之相对的旁轭5B的磁极7F之间,也分别形成间隙。并且,在旁轭5A的高频加速电极9A和与之相对的旁轭5B的高频加速电极9A之间也形成间隙,在旁轭5A的高频加速电极9B和与之相对的旁轭5B的高频加速电极9B之间也形成间隙。虽然未图示,但在旁轭5A的高频加速电极9C和与之相对的旁轭5B的高频加速电极9C之间、以及在旁轭5A的高频加速电极9D和与之相对的旁轭5B的高频加速电极9D之间,同样也分别形成间隙。

[0154] 上述在各磁极相互间形成的间隙以及在各高频加速电极相互间形成的间隙全部内包中间面77,形成离子束在水平方向上环绕的射束环绕区域76。

[0155] 在各旁轭5A、5B形成的凹部29A内配置无质量切割板12(参照图5),无质量切割板12位于磁极7A和磁极7B之间。使用图7和图8对该无质量切割板12进行详细说明。无质量切割板12以及后述的能量吸收体62分别是使离子束从离子束环绕的射束环绕轨道偏移的射束脱离装置。

[0156] 无质量切割板12具有铁芯部件30和线圈33A、33B。铁芯部件30具有铁制的铁芯部31A、31B和铁制的连接部31C。平板状的铁芯部31A以及平板状的铁芯部31B被配置成彼此相对且平行,各铁芯部31A和31B的一端部通过连接部31C连接。在铁芯部31A的与铁芯部31B相

对的面上形成突出部即多个(例如28个)磁极32A,这些磁极32A在铁芯部31A的长度方向上以预定间隔被配置成一行。在各磁极32A上分别卷绕了线圈33A。在铁芯部31B的与铁芯部31A相对的面上形成突出部即多个(例如28个)磁极32B,这些磁极32B在铁芯部31B的长度方向上以预定间隔被配置成一行。在各磁极32B上分别卷绕了线圈33B。

[0157] 在各线圈33A的两端各连接有一条配线23A。多个配线23A被捆绑,如图8所示,在铁芯部31A的一个侧面安装一束配线23A,在铁芯部31A的另一侧面安装另一束配线23A。此外,在各线圈33B的两端各连接有一条配线23B。将多个配线23B捆绑,如图8所示,在铁芯部31B的一个侧面安装一束配线23B,在铁芯部31B的另一侧面安装另一束配线23B。

[0158] 把在铁芯部31A形成的多个磁极32A和在铁芯部31B形成的多个磁极32B以一个磁极32A与一个磁极32B相对的方式进行配置。在各磁极32A与各磁极32B之间,形成环绕的离子束经过的间隙即射束通道35。射束通道35内包中间面77的一部分。

[0159] 将棒状的操作部件16的一端部安装在无质量切割板12的形成贯穿孔31D的连接部31C。该操作部件16既是无质量切割板12的支承部件,也与具有活塞和缸体的移动装置17的活塞连接(参照图3)。检测无质量切割板12在真空容器27内的位置的位置检测器38被安装在移动装置17上(参照图1)。操作部件16被配置在环状线圈11A和环状线圈11B之间,例如,贯穿旁轭5B的筒状部75B可滑动地安装在筒状部75B。移动装置17也可以是电动机。在作为移动装置17而使用电动机时,作为位置检测器38使用编码器,将该编码器与电动机的旋转轴连结。

[0160] 无质量切割板12是在配置于旁轭内的环状线圈的半径方向上的不同位置使离子束偏转的偏转电磁铁装置。

[0161] 射束电流测定装置98包括射束电流测定部15、移动装置17A以及位置检测器39。射束电流测定部15被配置在一点划线X上,该一点划线X在真空容器27内的中间面77,在凹部29A的位置经过真空容器27的中心轴C和入射用电极18(参照图3)。与射束电流测定部15连接的棒状的操作部件16A贯穿真空容器27,并延伸至真空容器27的外部。操作部件16A既是射束电流测定部15的支承部件,也在真空容器27的外部,与具有活塞和缸体的移动装置17A的活塞连接。操作部件16A被配置在环状线圈11A和环状线圈11B之间,例如,贯穿旁轭5B的筒状部75B并可滑动地被安装在筒状部75B上。检测射束电流测定部15在真空容器27内的位置的位置检测器39被安装在移动装置17A上(参照图1)。移动装置17A可以是电动机。在作为移动装置17A而使用电动机时,作为位置检测器39使用编码器,将该编码器与电动机的旋转轴相连结。

[0162] 操作部件16A经过在连接部31C形成的贯穿孔31D被插入到在无质量切割板12的多个磁极32A与多个磁极32B之间形成的射束通道35内(参照图5)。因此,在操作部件16A沿一点划线X在真空容器27的半径方向上移动时,射束电流测定部15在中间面77内在射束通道35内移动。此时,在沿无质量切割板12的各磁极32A的端面的一点划线X上,在凹部29A的位置,射束环绕轨道78相互间的间隔变宽,因此使射束电流测定部15在环状线圈的半径方向上在一点划线X上移动来进行测量,由此能够容易实施各射束环绕轨道78中的射束电流的测量。

[0163] 与高频加速电极9D连接的波导管10D被连接至高频电源36(参照图1)。虽然未图示,但与其他高频加速电极9A、9B和9C连接的各波导管10A、10B和10C也被连接至针对每个

高频加速电极设置的各高频电源36。分别与设在磁极7B的调整线圈8B的两端连接的引出配线21C、21D被连接至电源37(参照图1)。虽然未图示,但与设置在其他各磁极7A以及7C~7F的调整线圈8A和8C~8F各自的两端连接的上述各引出配线也被连接至针对每个磁极设置的各个电源37。以上的高频电源和磁极存在于旁轭5B内,在旁轭5A中,各高频加速电极9A~9D与各高频电源36连接,各磁极7A~7F与各电源37连接。并且,入射用电源18通过配线81被连接至电源82(参照图1)。

[0164] 与设置在旁轭5B的环状线圈11B连接的2条引出配线22被连接至电源57(参照图1)。与设置在旁轭5A的环状线圈11A连接的2条引出配线22被连接至上述的电源57。与在无质量切割板12的每个磁极32A、32B上缠绕的一个一个线圈33A、33B连接的上述各配线23A、23B被连接至一个电源40(参照图1)。

[0165] 从电源57经过各引出配线22向环状线圈11A、11B供给励磁电流。由于励磁电流的作用,铁芯14A、14B被磁化。来自各电源37的励磁电流经过引出配线21A、引出配线21C、引出配线21E、引出配线21G、引出配线21G、引出配线21I和引出配线21K被提供给设置在磁极7A~7F的调整线圈8A~8F,各磁极7A~7F进行励磁。启动离子源3。来自各高频电源36的高频电压通过各波导管10A~10D被施加至各高频加速电极9A~9D。向入射用电极18施加来自电源82的电压。

[0166] 由于铁芯14A、14B被磁化,在旁轭5B形成的各磁极7A~7F、与这些各个磁极相对的在旁轭5A形成的各磁极7A~7F、旁轭5A的底座部74A、旁轭5A的筒状部75A、旁轭5B的筒状部75B、旁轭5B的底座部74B以及在旁轭5B形成的各磁极7A~7F的闭合的磁路中产生磁力线。此时,还产生从在旁轭5B形成的各凹部29A~29F的底面95朝向与各底面95相对的在旁轭5A形成的各凹部29A~29F的底面95的磁力线。在相对的底面95间产生的磁力线比在相对的磁极间产生的磁力线少。在相对的磁极(凸部)间形成的磁场比在相对的凹部间形成的磁场强。

[0167] 结果,在真空容器27内的中间面77,形成图10所示的磁场分布。该磁场分布表示等时性磁场的分布。等时性磁场是即使被加速的离子束的能量增加从而离子束环绕的射束环绕轨道的半径变大,离子束环绕一周的时间不变的磁场。通过磁极7A~7F形成该等时性磁场。图10所示的“高”表示磁场强度高的区域,“低”表示磁场强度低的区域。在离子注入口,即入射用电极18的周围交替地形成磁场强度高的区域和磁场强度低的区域。在磁场强度高的区域中最高的磁场强度例如为2.2T,在磁场强度低的区域中最低的磁场强度例如为0.84T。在本实施例中,磁场强度高的区域和磁场强度低的区域分别存在6个。在将图3与图10重叠时,磁场强度高的6个区域分别与图3所示的磁极7A~7F中的一个磁极重叠,使得入射用电极18的位置与切割电磁铁19的位置(在图10中,射束环绕轨道78向切割电磁铁19侧偏移而多个射束环绕轨道78聚集的点(聚集点))一致。即,在磁场强度高的各个区域配置有各磁极。此外,磁场强度低的6个区域分别与图3所示的凹部29A~29F中的一个凹部重叠。即,在磁场强度低的各区域配置各凹部。

[0168] 从离子源3A释放的离子(例如,质子(H^+))经过离子入射管3A入射至射束环绕区域76,通过被施加了电压的入射用电极18的作用在射束环绕区域76中使行进方向向水平方向弯曲。入射的质子在使各磁极7A~7F以及环状线圈11A、11B励磁的状态下,通过各高频加速电极9A~9D被加速。在接近入射用电极18的区域,质子通过高频加速电极9C和9D被加速,在

接近环状线圈11A、11B的区域,质子通过高频加速电极9A~9D被加速。被加速的质子成为质子离子束(以下,简称为离子束),沿着在入射用电极18的周围形成的射束环绕轨道,在中间面77中进行环绕。具体地说,离子束在与中间面77垂直的方向上进行自由振荡(Betatron oscillation),因此在以中间面77为中心在该垂直方向上具有预定宽度的射束环绕区域76内进行环绕。

[0169] 图10表示在环状线圈11B内侧中间面77上的各射束环绕轨道78以及磁场强度的分布,并且表示了多个等时性线79。等时性线是将在同一时刻存在的环绕中的离子(例如,质子)的位置进行连结的线。图10中虚线所示的各等时性线79,从入射用电极18放射状地延伸并在途中(35MeV的离子束的射束环绕轨道的位置)弯曲。在旁轭5A、5B设置的磁极7A~7F的侧面与图10所示的相应的等时性线79一致。

[0170] 在加速器4中,在射束环绕区域76内形成的射束环绕轨道78,如图10所示,成为多个轨道。在图10中,在离子束的能量为250MeV以下的范围内,在0.5MeV以下的能量区域按每0.25MeV表示了射束环绕轨道78,在超过0.5MeV且1MeV以下的范围的能量区域按每0.5MeV表示了射束环绕轨道78,在超过1MeV且10MeV以下的范围的能量区域按每1MeV表示了射束环绕轨道78,在超过10MeV且50MeV以下的能量区域按每5MeV表示了射束环绕轨道78,在超过50MeV且100MeV以下的范围的能量区域按每10MeV表示了射束环绕轨道78,在超过100MeV且220MeV以下的范围的能量区域按每20MeV表示了射束环绕轨道78,在超过220MeV到250MeV为止的范围的能量区域按每15MeV表示了射束环绕轨道78。

[0171] 具有35MeV以下的能量的各离子束环绕的各个射束环绕轨道78是以入射用电极18为中心的环状射束环绕轨道。具有超过35MeV的能量的各离子束环绕的各个射束环绕轨道78是从入射用电极18偏心的环状射束环绕轨道。结果,在入射用电极18与切割电磁铁19之间,具有超过35MeV的能量的各离子束的各个射束环绕轨道78的中心以从射束出射路径20的入口离开的方式偏移,在射束出射路径20的入口侧射束环绕轨道78彼此间的间隔变得密集。特别是具有超过60MeV的能量的各离子束的各个射束环绕轨道78在射束出射路径20的入口侧聚集在预定的范围内。此外,在以入射用电极18为基点与射束出射路径20的入口180°相反的一侧,具有超过35MeV的能量的各离子束的各个射束环绕轨道78彼此间的间隔变宽,在入射用电极18与射束出射路径20的入口之间射束环绕轨道78彼此间的间隔变得密集。

[0172] 经过离子入射管3A通过入射用电极18在射束环绕区域76内向水平方向弯曲的质子成为具有低能量的离子束,沿着低能量的离子束环绕的射束环绕轨道而进行环绕。在被施加了高频电压的高频加速电极9C的弯曲点24M以及24N与前端之间的部分以及在被施加了高频电压的高频加速电极9D的弯曲点24O以及24P与前端之间的部分该离子束被加速,而向位于外侧的射束环绕轨道78转移。例如,在10MeV的离子束的射束环绕轨道78中环绕的10MeV的离子束在高频加速电极9C、9D的上述部分被加速,向位于外侧的11MeV的离子束的射束环绕轨道78转移,沿着该射束环绕轨道8进行环绕。这样,环绕的离子束被加速,依次向外侧的射束环绕轨道78转移,例如,设为转移至119MeV的离子束的射束环绕轨道78。在该射束环绕轨道78中环绕的119MeV的离子束通过高频加速电极9A~9D被加速,向外侧的220MeV的离子束的射束环绕轨道78转移。

[0173] 沿着220MeV的离子束的射束环绕轨道78环绕的220MeV的离子束通过无质量切割

板12从该射束环绕轨道78被射出,即从该射束环绕轨道78脱离,从而经过在切割电磁铁19形成的射束出射路径20出射到射束输送系统13的射束路径48。此外,沿着140MeV的离子束的射束环绕轨道78环绕的140MeV的离子束通过无质量切割板12被射出,从而经过射束出射路径20出射到射束路径48。这样,能够从离子束产生装置2的加速器4出射能量不同的离子束。在入射用电极18与射束出射路径20的入口之间各射束环绕轨道78向射束出射路径20的入口侧偏移,射束环绕轨道78彼此间的间隔变得密集,在以入射用电极18为基点与射束出射路径20的入口 180° 相反的一侧,射束环绕轨道78彼此间的间隔变宽,由此实现这样的离子束的出射。特别是在后述的轨道偏心区域,能量不同的离子束环绕的多个射束环绕轨道78在射束出射路径20的入口侧聚集,这有助于能量不同的离子束的出射。另外,在后面详细叙述无质量切割板12的功能。

[0174] 本实施例中所使用的加速器4形成了轨道同心区域(例如,图10所示的包含35MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78,与该射束环绕轨道78相比内侧的区域)以及轨道偏心区域(例如,图10所示的与35MeV的离子束所环绕的射束环绕轨道78相比外侧的区域),轨道同心区域是在射束环绕区域76内的形成射束环绕轨道78的中间面77上形成以入射用电极18(离子入射管3A的离子注入口)为中心的同心的多个环状射束环绕轨道的区域,轨道偏心区域是包围该轨道同心区域形成中心相互偏心的多个环状射束环绕轨道,在入射用电极18与射束出射路径20的入口之间这些环状射束环绕轨道的间隔变得密集,相反在以入射用电极18为基点与射束出射路径20的入口 180° 相反的一侧这些环状射束环绕轨道的间隔变宽的区域。

[0175] 配置在真空容器27内的高频加速电极9C和9D上形成的各弯曲点24M~24P,例如也位于图10所示的35MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78的位置。

[0176] 图11表示加速器4中的沿等时性线 IL_1 的旁轭5A的磁极7E和与之相对的旁轭5B的磁极7E之间的间隙的变化,图12表示沿等时性线 IL_2 的旁轭5A的磁极7C和与之相对的旁轭5B的磁极7C之间的间隙的变化,图13表示沿等时性线 IL_3 的旁轭5A的磁极7A和与之相对的旁轭5B的磁极7A之间的间隙的变化。图11、图12以及图13所示的间隙表示相对的磁极7E之间的间隙、相对的磁极7C之间的间隙、以及相对的磁极7A之间的间隙的 $1/2$ 。这些间隙相当于磁极7E与中间面77之间的间隙、磁极7C与中间面77之间的间隙、以及磁极7A与中间面77之间的间隙。另外,图3和图10中分别示出了上述的等时性线 IL_1 、 IL_2 和 IL_3 。在水平方向,各等时性线 IL_1 、 IL_2 和 IL_3 相当于各磁极7E、7C和7A的中心线。

[0177] 如图11所示,磁极7E与中间面77之间的间隙相对于磁极7E的与入射用电极18相对的前端和与环状线圈11B的内面相对的磁极7E的端面之间的沿等时性线 IL_1 的长度,优选在其前端开始 $93.0\% \sim 96.0\%$ 范围内的位置为最窄。这表示在该范围内的位置,磁极7E在中心线上的中心轴C方向的高度(从凹部29D、29E的各底面95起的磁极7E的高度)变得最高。相对于一点划线X与磁极7E对称地配置的磁极7F在磁极7F的中心线上的中心轴C方向的高度(从凹部29C、29D的各底面95起的磁极7F的高度)也与磁极7E同样地,相对于磁极7F的沿着中心线的长度从与入射用电极18相对的前端起在该范围内的位置变得最高。

[0178] 如图12所示,磁极7C与中间面77之间的间隙相对于磁极7C的与入射用电极18相对的前端和与环状线圈11B的内面相对的磁极7C的端面之间的沿等时性线 IL_2 的长度,优选在其前端开始 $86.2\% \sim 89.2\%$ 范围内的位置为最窄。这表示在该范围内的位置,磁极7C在

中心线上的中心轴C方向的高度(从凹部29E、29F的各底面95起的磁极7C的高度)变得最高。相对于一点划线X与磁极7C对称地配置的磁极7D在磁极7D的中心线上的中心轴C方向的高度(从凹部29B、29C的各底面95起的磁极7B的高度)也与磁极7C同样地,相对于磁极7D的沿着中心线的长度从与入射用电极18相对的前端起在该范围内的位置变得最高。

[0179] 此外,如图13所示那样,磁极7A与中间面77之间的间隙相对于磁极7A的与入射用电极18相对的前端和与环状线圈11B的内面相对的磁极7A的端面之间的沿等时性线 IL_3 的长度,优选在从其前端开始88.7%~91.7%范围内的位置为最窄。这表示在该范围内的位置,磁极7A在中心线上的中心轴C方向的高度(从凹部29A、29F的各底面95起的磁极7A的高度)变得最高。相对于一点划线X与磁极7A对称地配置的磁极7B在磁极7B的中心线上的中心轴C方向的高度(从凹部29A、29B的各底面95起的磁极7B的高度)也与磁极7A同样地,相对于磁极7B的沿着中心线的长度从与入射用电极18相对的前端起在该范围内的位置变得最高。虽然未图示,但凹部29E的底面95的中心轴C方向的位置与各凹部29A~29C、29F的底面95的中心轴C方向的各位置相同。

[0180] 在旁轭5A中,磁极7E和7F在各磁极的中心线上的中心轴C方向的高度也在旁轭5B的磁极7E和7F的上述范围内的位置变得最高。此外,在旁轭5A中,磁极7C和7D在各磁极的中心线上的中心轴C方向的高度也在旁轭5B的磁极7C和7D的上述范围内的位置变得最高,磁极7A和7B在各磁极的中心线上的中心轴C方向的高度也在旁轭5B的磁极7A和7B的上述范围内的位置变得最高。

[0181] 结果,在旁轭5B与旁轭5A之间的中间面77上的磁场强度分布中,在旁轭5B的磁极7E和7F在上述范围内的位置与这些各磁极7E和7F相对的旁轭5A的各磁极7E和7F之间的磁场强度、在旁轭5B的磁极7C和7D在上述范围内的位置与这些各磁极7C和7D相对的旁轭5A的各磁极7C和7D之间的磁场强度、以及在旁轭5B的磁极7A和7B在上述范围内的位置与这些各磁极7A和7B相对的旁轭5A的各磁极7A和7A之间的磁场强度,如图10所示的2.2T那样,变得最高。由此,中间面77上的磁场强度在配置有各磁极7A~7F的区域中,在与各环状线圈11A、11B的内面相比更内侧的区域,例如如图10所示,在200MeV和180MeV的各个射束环绕轨道78的位置变得最高。通过这样的磁场强度的分布,能够在相对于射束环绕轨道垂直的方向上赋予聚集力,能够使离子束沿射束环绕轨道78稳定地环绕。

[0182] 在本实施例使用的加速器4中,中间面77上的磁场分布不一样,因此所形成的射束环绕轨道78为环状但并不是正圆。如上所述,在铁芯14A、14B,各磁极(凸部)7A~7F所处位置的磁场强度比各凹部29A~29F所处位置的磁场强度强,因此在各铁芯14A、14B形成的相对的磁极间,射束环绕轨道的曲率变大。在射束环绕轨道78的一圈上的6个位置配置上述相对的一对磁极。因此,各射束环绕轨道成为具有大致六角形的角的形状。在图14中,沿着射束环绕轨道的磁场强度的振幅越大的射束环绕轨道,该倾向变得越强。若磁场强度的振幅相同,则越是低能量侧的射束环绕轨道,离子束越容易弯曲,因此该倾向变强。不是正圆的射束环绕轨道的中心是轨道形状的重心,是成为轨道坐标的算术平均的点。

[0183] 另外,若是一般的回旋加速器,则越是存在于外周的射束环绕轨道,随着离子束的能量上升,离子束越难以弯曲,聚集变得困难。因此,需要增大图14所示的沿射束环绕轨道的磁场强度的振幅。也就是说,一般设计成沿着各磁极的中心线的半径方向的磁场强度在其最大能量的射束环绕轨道(最外周的射束环绕轨道)成为最大。

[0184] 使用图14~图21,对本实施例的加速器4的特性进行说明。以下,在没有特别限定的情况下,将垂直于中心轴C的方向称为“水平方向”,将中心轴C的方向,即垂直于中间面77的方向称为“垂直方向”。

[0185] 图14表示了0.5MeV的离子束、70MeV的离子束、160MeV的离子束以及235MeV的离子束分别环绕的4个射束环绕轨道78中,沿各射束环绕轨道78的磁场强度的分布。行进方向距离为“0”的位置是在切割电磁铁19形成的射束出射路径20的入口(加速器4的出射口)附近的将该入口与中心轴C进行连结的直线(一点划线X)与各射束环绕轨道78的各交点的位置。行进方向距离为“1”的位置是从加速器4的出射口绕射束环绕轨道78半圈的位置。在各射束环绕轨道78中,沿射束环绕轨道78的磁场强度如图14所示那样变化,因此能够确保聚集力(振幅),能够使各能量的离子束在各射束环绕轨道78上稳定地环绕。在235MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78中,能够通过不是单纯的正弦波的磁场强度的分布确保聚集力,使离子束在相应的射束环绕轨道上稳定地旋转。具体地说,关于235MeV的离子束的射束环绕轨道,按如下方式形成了磁场:在环绕一圈的期间经过的磁场强度的6个最大峰值中,从行进方向距离为0的位置开始第2个以及第5个最大峰值比其他最大峰值低,这些第2个以及第5个最大峰值两侧的最小峰值比其他最小峰值高。因此,235MeV的离子束的射束环绕轨道与其内侧的160MeV的离子束的射束环绕轨道相比,经过的磁场强度的变动的振幅小。

[0186] 图15表示沿射束环绕轨道78的标准化磁场的梯度变化。标准化磁场为用式(1)表示的n值。

[0187] [公式2]

$$[0188] \quad n = \frac{B\rho}{B^2} \frac{\partial B_z}{\partial r} \quad \dots (1)$$

[0189] 其中,B为磁场强度,B ρ 为离子束的磁刚性系数,B $_z$ 为磁场的垂直成分。r为与中间面77即轨道面内的射束环绕轨道相对的垂直方向的位置坐标,将朝外设为正。在n<1时,在射束环绕轨道环绕的离子束在水平方向聚集,在n>0时,在射束环绕轨道环绕的离子束在垂直方向聚集。

[0190] 在70MeV的离子束、160MeV的离子束以及235MeV的离子束各自环绕的3个射束环绕轨道78中,在行进方向距离为“1”的位置(以下的从各交点开始半周的位置)n值小,但是在射束出射路径20的入口(加速器4的出射口)附近的将该入口与中心轴C进行连结的直线(一点划线X)与各射束环绕轨道78的各交点的位置,即各射束环绕轨道78的行进方向距离为“0”的位置附近n值的绝对值变大。这是因为在行进方向距离为“0”的位置如上所述各能量的射束环绕轨道集中,相邻的射束环绕轨道的相互间的间隔小。作为其结论,磁场梯度即n值的绝对值变大,相反,在相邻的射束环绕轨道的相互间的间隔大的行进方向距离为“1”的位置(半圈的位置)磁场梯度的绝对值变小。如此,通过沿着射束环绕轨道使水平方向的聚集作用以及垂直方向的聚集作用交替地作用于环绕的离子束,能够使离子束稳定地在水平方向以及垂直方向上进行环绕。

[0191] 图15所示的特性表示以下所述的概念。在各环状的射束环绕轨道78中,射束环绕轨道78的将中心轴C设为基点射束出射路径20的入口的180°相反一侧的位置(行进方向距离为“1”的位置)作为中心的半圈(以行进方向距离“1”的位置为基点向顺时针方向1/4圈和以行进方向距离“1”的位置为基点向逆时针方向1/4圈的总和)的、通过上述式(2)表示的n

值的绝对值的积分值小于射束环绕轨道78的以射束出射路径20的入口侧的上述交点(行进方向距离为“0”的位置)为中心的半圈(以行进方向距离“0”的位置为基点向顺时针方向1/4圈和以行进方向距离“0”的位置为基点向逆时针方向1/4圈的总和)的、n值的绝对值的积分值。

[0192] 因为环状的射束环绕轨道的以射束出射路径的入口的180°相反一侧的位置为中心的半圈的用上述式(1)表示的n值的绝对值的积分值小于射束环绕轨道的以射束出射路径的入口为中心的半圈的n值的绝对值的积分值,所以能够高效地出射能量不同的各离子束,并且,在射束环绕轨道偏心,不同能量的射束环绕轨道在射束出射路径的入口侧聚集时,能够缓和由于聚集而在射束出射路径的入口侧发生的磁场梯度的倾斜。

[0193] 接着,详细叙述磁场分布。用式(2)表示某个射束环绕轨道78上的某个位置的磁场强度 $B(L_1)$ 。

$$[0194] \quad B(L_1) = B_0 + B_1 \cos(2\pi L_1/L_2) + B_2 \cos(4\pi L_1/L_2)$$

$$[0195] \quad + B_3 \cos(6\pi L_1/L_2) \dots (2)$$

[0196] 其中,B为磁场强度, L_1 为射束环绕轨道的离子束行进方向的距离, L_2 为射束环绕轨道的半圈的长度, B_0 为磁场强度的中心值(离子束受到的平均的磁场强度), B_1 、 B_2 和 B_3 为每个能量的射束环绕轨道78中的磁场强度的傅里叶展开系数。另外,以射束环绕轨道的半圈的长度为基准波长, B_1 表示1倍高次谐波的振幅, B_2 表示2倍高次谐波的振幅, B_3 表示3倍高次谐波的振幅。

[0197] 在本实施例中,如图16所示,当离子束的动能为大约180MeV以上时,3倍高次谐波的磁场成分 B_3 上升,但同时2倍高次谐波的磁场成分 B_2 减少。因此,在具有180MeV以上的能量的各离子束环绕的各射束环绕轨道78中,能够不增大最大磁场来确保离子束的聚集力。3倍高次谐波的磁场成分 B_3 为轨道同心区域。

[0198] 图17表示与离子束的动能对应的自由振荡数在水平方向和垂直方向的变化。水平方向的自由振荡数随着离子束的动能的增加,大致单调地增加。但是,在动能为0~250MeV的范围内,该自由振荡数的变化幅度为0.6以下。在动能50MeV附近,射束环绕轨道向垂直方向偏转,但随着该动能的增加,垂直方向的自由振荡数收敛至0.5以下。因此,离子束能够在图6所示的相对的磁极之间以及相对的高频电极之间形成的射束环绕区域76内稳定地环绕。并且,该离子束还能够在图7所示的无质量切割板12形成的射束通道35内稳定地通过。

[0199] 图18表示从射束出射路径20的入口附近的将该入口与中心轴C相连结的直线(一点划线X)与具有0.5MeV、70MeV、160MeV以及235MeV各个能量的各离子束所环绕的各射束环绕轨道78之间的各交点(离子束行进方向上的距离:0)开始半圈(离子束行进方向上的距离:1)的沿各射束环绕轨道78的水平方向的 β 函数的变化。 β 函数是表示离子束的空间上的扩展的量。在离子束行进方向上的距离为1的位置,配置无质量切割板12。

[0200] 根据图18,在配置有无质量切割板12的位置,水平方向的 β 函数为10m以下,能够将具有0.5MeV、70MeV、160MeV和235MeV各能量的各离子束所环绕的各射束环绕轨道78进行分离。因此,能够通过无质量切割板12分别射出具有这些能量的离子束,并能够从加速器4出射到射束输送系统13。

[0201] 图19表示从具有0.5MeV、70MeV、160MeV和235MeV各能量的各离子束所环绕的各射束环绕轨道78的出射口(离子束行进方向上的距离:0)开始半圈(离子束行进方向上的距

离:1)的沿各射束环绕轨道78的垂直方向的 β 函数的变化。在配置了无质量切割板12的离子束的行进方向的距离为1的位置,从加速器4出射的具有70MeV、160MeV和235MeV各能量的各个离子束的垂直方向的 β 函数为3m以下,因此这些能量的离子束能够容易地通过无质量切割板12的射束通道35。此外,在从各射束环绕轨道78的出射口至半圈之间,垂直方向的 β 函数为不与加速器4内的磁极发生冲突的限度即100m以下,因此在相对的磁极间以及相对的高频加速电极间形成的射束环绕区域76内,能够不与磁极以及高频加速电极发生冲突地稳定地进行环绕。

[0202] 在图20中与环绕的离子束的动能对应地表示在从加速器4出射离子束时,通过无质量切割板12的磁极的励磁而在射束环绕轨道78中环绕的离子束的射出量。在切割电磁铁19形成的射束出射路径20的入口位于以最低能量的射束环绕轨道的中心为基准,图10中的-720mm的位置。在此,将从加速器4出射的离子束的能量设为70MeV以上。图20所示的“轨道位置”表示未通过无质量切割板12射出的各能量的离子束所经过以及最接近射束出射路径20的入口的射束环绕轨道78的在射束出射路径20的入口附近的位置。图20所示的轨道位置与射束出射路径20的入口之间的偏移量表示由于使用无质量切割板12离子束从所环绕的射束环绕轨道78射出而产生的轨道位移量。环绕的离子束的能量越低,该离子束的射出量越大。根据该射出量来调节无质量切割板12向相应的一对磁极32A、32B上分别设置的线圈33A、33B供给的励磁电流。

[0203] 无质量切割板12的相对的一对磁极32A和32B在与配置了无质量切割板12的旁轭5A、5B的凹部29A中产生的磁力线的方向相同的方向上产生磁力线(从磁极32B向磁极32A的磁力线),进行励磁以便增强磁场。在无质量切割板12中形成的射束通道35内,在真空容器27的半径方向上的中间面77内的预定位置,形成如图22所示的磁场的峰值。磁场峰值的位置与在无质量切割板12上形成的能够选择性励磁的28对磁极32A以及32B中的某个位置相对应。在通过无质量切割板12的相对的一对磁极32A和32B的励磁而形成的射束通道35内的局部性磁场强的区域中经过的离子束的曲率与射束环绕轨道78的曲率相比变大。因此,按照无质量切割板12的励磁量及其宽度,将该离子束的水平方向的自由振荡放大,与所环绕的射束环绕轨道78相比向内侧方向射出离子束,离子束从射束环绕轨道78脱离。另外,关于射束通道35内的磁场强度的峰值产生位置,因为能够通过移动装置17使无质量切割板12在半径方向上移动来调整进行励磁的一对磁极32A、32B在半径方向上的位置,因此与在无质量切割板12上设置了以上的磁极32A、32B的情况同样地,能够高精度地调整磁场强度的峰值产生位置。

[0204] 图21表示在70MeV的离子束、160MeV的离子束以及235MeV的离子束分别通过无质量切割板12而被射出时,被射出的离子束从无质量切割板12到达在切割电磁铁19形成的射束出射路径20的入口为止的、射束环绕区域76的水平方向的从相应能量的射束环绕轨道开始的位移。图21与其他的图不同,在离子束的行进方向的距离为“0”的位置配置有无质量切割板12,射束出射路径20的入口(离子束取出位置)位于离子束的行进方向的距离为“1”的位置(从无质量切割板12开始半圈的位置)。在水平方向的位移为正值时,意味着被射出的离子束向射束环绕轨道78的外侧进行了位移,水平方向的位移(中间面77内的位移)为负值时,意味着被射出的离子束向射束环绕轨道78的内侧进行了位移。通过无质量切割板12向射束环绕轨道的内侧射出的离子束在向内侧以某程度进行了位移后,按照水平方向的自由

振荡向射束环绕轨道的外侧进行大位移。对无质量切割板12进行控制使得环绕的离子束的能量越小,被射出的离子束在水平方向的位移的绝对值越大,在离子束取出位置的向射束环绕轨道外侧的位移也变大。如在图21中说明的那样,能量不同的离子束环绕的各射束环绕轨道78与射束出射路径20的入口之间的距离不同是由于图20所示的与各能量的离子束相对的各射束环绕轨道78与切割电磁铁19之间的距离不同。

[0205] 形成轨道同心区域以及轨道偏心区域的加速器4通过图14~图21所示的各特性,能够使各能量的离子束沿各个射束环绕轨道78稳定地环绕,能够向要照射离子束的患部的被分割后的深度不同的各层连续出射可照射的具有不同能量的各离子束。

[0206] 使用图23~图26,对使用粒子束照射装置的粒子束照射方法进行说明。

[0207] 在治疗前使用治疗计划装置73生成照射离子束来治疗癌患部的每个患者56的治疗计划数据。该治疗计划数据包括患者的识别编号、从患者的体表面向深度方向分割的患部的层数、向每个层照射的离子束的能量、离子束的照射方向、各层内的照射位置(点位置)以及针对各层内的各照射位置的离子束的照射量等数据。将治疗计划装置73生成的治疗计划数据存储在存储装置即数据库72中。

[0208] CPU67使用输入的患者识别信息,从数据库72读入与之后要进行治疗的患者56相关的治疗计划数据,并存储到存储器68中。在存储器68中与要照射的离子束的能量(例如,70MeV~235MeV)对应地存储有向射束输送系统13的四极电磁铁46、47、49和50以及偏转电磁铁41~44供给的励磁电流值、在加速器4内的中间面77各能量的离子束环绕的各个射束环绕轨道的位置信息以及在将在各射束环绕轨道中环绕的离子束射出时向无质量切割板12的磁极32A、32B上分别缠绕的线圈33A、33B供给的励磁电流值。

[0209] 作为控制信息生成装置,CPU67为了对患者56的患部进行治疗,使用治疗计划数据、向射束输送系统13的各电磁铁供给的励磁电流值、各射束环绕轨道的位置信息以及向无质量切割板12的线圈33A、33B供给的励磁电流值,生成用于控制射束输送系统13的各电磁铁以及无质量切割板12的控制指令信息。

[0210] 将图23所示的各工序的步骤存储在存储器68中,根据该步骤CPU67向加速器/输送系统控制装置69以及扫描控制装置70中包含的各控制装置输出控制指令信息。

[0211] 向环状线圈以及调整线圈供给励磁电流(步骤S1)。从CPU67输入了控制指令信息的线圈电流控制装置94为了实施步骤S1的工序而对各电源37以及电源57进行控制。如上所述,从各电源37向调整线圈8A~8F供给励磁电流来使磁极7A~7F励磁。此外,从电源57向环状线圈11A、11B供给励磁电流来使铁芯14A、14B励磁。结果,在铁芯14A、14B中产生上述的磁力线。在环状线圈11A、11B以及调整线圈8A~8F中流过图25所示的环状线圈电流以及调整线圈电流。真空泵25始终被驱动,经过吸引管26向外部排出真空容器27内的空气,使真空容器27内维持真空。构成真空容器27的旁轭5A、5B的波导管、引出配线、操作部件16、16A各自的贯穿部通过密封部件被封闭,保持气密性。

[0212] 启动离子源(步骤S2)。从CPU67输入了控制指令信息的加速器/输送系统控制装置69启动并控制离子源3。

[0213] 向高频加速电极施加高频电压(步骤S3)。高频电压控制装置99为了实施步骤S3的工序,根据来自CPU67的控制指令信息对各高频电源36进行控制,调节向各高频加速电极9A~9D施加的高频电压。结果,如上所述,高频加速电极9A~9D被施加高频电压。图25所示的

频率的高频电压被施加到高频加速电极9A~9D。

[0214] 向入射用电极施加电压(步骤S4)。入射用电极控制装置83为了实施步骤S4的工序,根据来自CPU67的控制指令信息对电源80进行通知,向入射用电极18施加电压。通过向入射用电极18施加电压,从离子源3经过在离子入射管3A的前端形成的离子注入口而入射到在射束环绕区域76内形成的离子入射部109的离子(质子)通过入射用电极18向水平方向弯曲,并在位于该离子入射部109附近的高频加速电极9C与高频加速电极9D的连接部被加速而开始向逆时针方向环绕。

[0215] 直到能量增加至设定能量为止使离子束在加速器内环绕(步骤S5)。入射的质子成为离子束,在使各磁极7A~7F以及环状线圈11A、11B励磁的状态下,首先,离子束通过被施加了高频电压的高频加速电极9C以及9D加速至70MeV。在70MeV以下的能量的各射束环绕轨道中,离子束通过这些2个高频加速电极在环绕射束环绕轨道一圈时被加速4次。在超过70MeV的能量的区域中,被施加了高频电压的高频加速电极9A以及9B也对离子束的加速有帮助,结果,离子束通过高频加速电极9A~9D被加速至220MeV。在超过70MeV的能量的各射束环绕轨道中,离子束通过这些4个高频加速电极在环绕射束环绕轨道一圈时被加速8次。在加速器4内,被加速的离子束在中间面77内的射束环绕轨道78中进行环绕,该离子束的能量被增加至设定能量(例如250MeV)。此时,在配置了无质量切割板12的位置,例如,在图10所示的与70MeV~250MeV的各个离子束对应的各射束环绕轨道78中进行环绕的这些离子束经过在无质量切割板12的相对的磁极32A、32B之间形成的射束通道35。

[0216] 为了治疗,向患者56的患部照射具有70MeV以上的能量的离子束。具有该70MeV以上的能量的离子束是向作为照射对象的患部照射的离子束中的具有最小能量的离子束。

[0217] 测定在各射束环绕轨道环绕的离子束(步骤S6)。为了实施步骤S6的工序,射束电流测定部控制装置84根据来自CPU67的控制指令信息对移动装置17A进行控制。通过该控制,移动装置17A被驱动从而使操作部件16A移动。通常,被拉出到环状线圈11A与环状线圈11B之间的位置的射束电流测定部15通过操作部件16A的移动,经过连接部31C的贯穿孔31D到达射束通道35内,在中间面77沿一点划线X向入射用电极18移动。射束电流测定部15一边向入射用电极18移动,一边对每个射束环绕轨道78测定在各射束环绕轨道78(例如,图10所示的250MeV的离子束所环绕的射束环绕轨道78至70MeV的离子束所环绕的射束环绕轨道78)中环绕的离子束的射束电流。由射束电流测定部15测定出的各射束电流的值相当于在各射束环绕轨道78中环绕的离子束的能量。与测定出的各射束电流的值对应的各个能量信息被传递至射束电流测定部控制装置84。通过位置检测器39对每个射束环绕轨道78检测朝向入射用电极18的射束电流测定部15的位置。由位置检测器39检测出的射束电流测定部15的位置信息,即环状线圈的半径方向上的射束环绕轨道78的位置信息也被传递至射束电流测定部控制装置84。射束电流测定部控制装置84将与测定出的各射束电流值对应的各能量信息与各射束环绕轨道78的位置信息相互对应起来存储在加速器/输送系统控制装置69的存储器107中。图24表示将各能量信息与各射束环绕轨道78对应起来而得的信息的一例。

[0218] 判定射束环绕轨道是否形成在预定的位置(步骤S23)。线圈电流控制装置94根据从存储器107读出的各射束环绕轨道78的位置信息,判定在中间面77中各射束环绕轨道78是否形成在各预定位置。

[0219] 调节向调整线圈供给的励磁电流(步骤S24)。在各射束环绕轨道78中的至少一个

射束环绕轨道78的位置从预定位置偏移时,步骤S23的判定结果为“否”。此时,线圈电流控制装置94控制与设置在磁极7A~7F的各调整线圈8A~8F相连接的电源37,调节向各调整线圈8A~8F供给的励磁电流,使得在预定位置形成从预定位置偏移的射束环绕轨道78。通过这样的励磁电流的调节,对射束环绕轨道的位置进行修正。

[0220] 之后,实施步骤S6以及S23的各工序。在步骤S23的判定结果为“否”时,反复进行步骤S24、S6和S23的各工序直至步骤S23的判定结果成为“是”。当在中间面77形成的全部射束环绕轨道78形成在各预定位置时,步骤S23的判定结果为“是”,实施步骤S7的工序。

[0221] 调节切割电磁铁以及射束输送系统的各电磁铁的励磁量(步骤S7)。为了实施步骤S7的工序,电磁铁控制装置85根据来自CPU67的控制指令信息对电源82进行控制,将向切割电磁铁19供给的励磁电流调节为与要出射的离子束的能量(例如250MeV)对应的励磁电流。通过该励磁电流使切割电磁铁19励磁。此外,电磁铁控制装置85根据该控制指令信息对其他电源(未图示)进行控制,将向射束输送系统13的四极电磁铁46、47、49和50以及偏转电磁铁41~44供给的励磁电流调节为与要出射的离子束的能量(例如250MeV)对应的励磁电流。通过该励磁电流使这些四极电磁铁以及这些偏转电磁铁进行励磁。使切割电磁铁19以及设置在射束输送系统13的各电磁铁励磁成为能够将250MeV的离子束移送至出射装置7的状态。

[0222] 调节无质量切割板的磁极的位置(步骤S8)。为了实施步骤S8的工序,无质量切割板控制装置86根据来自CPU67的控制指令信息对移动装置17进行控制,使用移动装置17使操作部件16移动,从而使无质量切割板12在真空容器27的半径方向上沿着一点划线X,以真空容器27的中心轴C为基点从与射束出射路径20的入口180°相反一侧的位置向入射用电极18进行移动。无质量切割板12通过移动装置17例如能够在10mm程度的范围内移动。为了对相对的一对磁极32A、32B的定位进行微调而进行该范围内的移动。通过该无质量切割板12的移动,在以中心轴C为基点与射束出射路径20的入口180°相反一侧相邻的射束环绕轨道78的间隔变宽的区域中,例如,在与250MeV的离子束所环绕的射束环绕轨道78相吻合的状态下应该励磁的一对磁极32A、32B各自的入射用电极18侧的角与该射束环绕轨道78相吻合。此时,无质量切割板12在真空容器27内的位置成为图25所示的在最左侧表示的无质量切割板12的位置。

[0223] 对无质量切割板的磁极进行励磁(步骤S9)。在相应的一对磁极32A、32B与250MeV的离子束所环绕的射束环绕轨道78吻合后,无质量切割板控制装置86为了实施步骤S9的工序,根据来自CPU67的控制指令信息对电源40进行控制。并且,无质量切割板控制装置86对开关进行控制,将与上述应该励磁的各磁极32A、32B上缠绕的各线圈33A、33B相连接的各配线23A、23B连接到电源40。来自电源40的励磁电流被供给至上述各线圈33A、33B,使该相对的应该励磁的一对磁极32A、32B分别励磁。通过该励磁,在进行了励磁的磁极32A、32B、铁芯部31B、连接部31C、铁芯部31A以及磁极32A的闭合的磁路中产生磁力线。从该磁极32A向该磁极32B的磁力线横穿在这些磁极间形成的离子束经过的射束路径35。通过该磁力线的作用,250MeV的离子束从该离子束环绕的射束环绕轨道78射出而离开该射束环绕轨道78,向在切割电磁铁19形成的射束出射路径20的入口移动。

[0224] 最终,射出的250MeV的离子束通过进行了励磁的切割电磁铁19的作用,经过射束出射路径20出射到射束输送系统13的射束路径48。该离子束经过射束路径48被导入照射装

置7,从照射装置7出射。此时,患者56没有躺在治疗台55上。

[0225] 确认离子束从加速器的出射(步骤S10)。设在照射装置7的射束位置监视器53检测经过照射装置7的离子束的位置。将检测出的离子束的位置信息从射束位置监视器53输入到离子束确认装置87。离子束确认装置87在输入了离子束的位置信息时,判定为从加速器4出射了离子束,并将该判定结果在显示装置(未图示)中输出。操作员观察在显示装置显示的该判定结果,来确认离子束的出射。

[0226] 如上所述,结束用于从加速器取出离子束的各工序的说明。

[0227] 接着,根据图26所示的顺序,说明粒子束照射方法中的向患者患部的每层照射能量不同的各离子束的各工序。

[0228] 当患者56躺在治疗台55上后,使治疗台55移动而将患部定位到照射装置7的射束轴的延长线上。

[0229] 使旋转台架旋转,将照射装置的射束轴设定为向患部(射束照射对象)的离子束照射方向(步骤S11)。通过离子束照射进行治疗的患者56的患部为射束照射对象。为了实施步骤S11的工序,旋转控制装置88根据来自CPU67的控制指令信息对旋转台架6的旋转装置(未图示)进行控制。驱动该旋转装置,旋转台架6根据上述的治疗计划数据中包含的离子束的照射方向信息,以旋转轴45为中心旋转到照射装置7的离子束经过的射束轴被设定为该照射方向。在照射装置7的射束轴与该照射方向一致时,停止旋转台架6的旋转。

[0230] 设定要照射射束的射束照射对象内的一个层(步骤S12)。照射位置控制装置89根据来自CPU67的控制指令信息设定患部内的要照射离子束的一个层。关于照射位置控制装置89进行的该层的设定,根据存储器70中存储的治疗计划数据即对患部进行分割而得的多个层的信息,设定位于最深处的层。并且,照射位置控制装置89从存储器70检索向设定的层照射的离子束的能量信息(例如220MeV)。照射位置控制装置89将检索到的离子束的能量信息输出到无质量切割板控制装置86。

[0231] 进行无质量切割板的磁极的定位(步骤S13)。在无质量切割板12形成的多个磁极32A、32B中的,与向上述设定的层照射的离子束的能量(例如220MeV)对应地定位在220MeV的离子束的射束环绕轨道78的一对磁极32A、32B是与步骤S8中定位在250MeV的离子束环绕的射束轨道78的一对磁极32A、32B相比位于入射用电极18一侧的另外一对相对的磁极32A、32B。无质量切割板控制装置86从照射位置控制装置89输入通过照射位置控制装置89设定的层的信息。无质量切割板控制装置86根据从照射位置控制装置89输入的向设定的层照射的离子束的能量(220MeV)以及存储器107中存储的与能量对应的射束环绕轨道78的位置信息(位置检测装置39检测出的射束电流测定部15的位置信息),确定无质量切割板12的多对磁极32A、32B中的定位在220MeV的离子束的射束环绕轨道78并进行励磁的一对磁极32A、32B。并且,无质量切割板控制装置86求出环状线圈的半径方向上的无质量切割板12的移动量,该无质量切割板12的移动量用于将根据存储器107中存储的射束环绕轨道78的位置信息而确定的一对磁极32A、32B各自的入射用电极18侧的角定位在220MeV的离子束的射束轨道78上。

[0232] 无质量切割板控制装置86根据求出的无质量切割板12的移动量对移动装置17进行控制,使无质量切割板12向入射用电极18移动。通过该移动,将上述确定的应该励磁的磁极32A、32B各自的入射用电极18侧的角在以中心轴C为基点与射束出射路径20的入口 180°

相反一侧相邻的射束环绕轨道78的间隔变宽的区域中,定位在220MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78上。能够根据位置检测器38测定出的无质量切割板12的位置数据,确认基于所确定的一对磁极32A、32B的定位的无质量切割板12的移动量。步骤S13的工序与上述步骤S8的工序实质相同。

[0233] 对无质量切割板的磁极进行励磁(步骤S14)。步骤S13中的磁极的定位结束后,无质量切割板控制装置86根据所确定的一对磁极32A、32B的信息对开关进行控制,将与步骤S13中定位后的应励磁的其他各磁极32A、32B上缠绕的各线圈33A、33B相连接的各个配线23A、23B连接至电源40。并且,无质量切割板控制装置86根据来自CPU67的控制指令信息对电源40进行控制,控制电源40以便输出励磁电流,该励磁电流可得到图20所示的为了使220MeV的离子束入射至射束出射路径20的入口而需要的射出量。向上述那样定位后的相对的应励磁的一对磁极32A、32B上缠绕的各线圈33A、33B供给该励磁电流,使该应励磁的一对磁极32A、32B进行励磁。步骤S13的工序与上述步骤S8的工序实质相同。

[0234] 调节切割电磁铁以及射束输送系统的各电磁铁的励磁量(步骤S7)。电磁铁控制装置85从照射位置控制装置89输入由照射位置控制装置89设定的层的信息。电磁铁控制装置85根据向该设定的层照射的离子束的能量信息(例如220MeV),如上所述对电源82进行控制,通过与出射的220MeV的离子束对应的励磁电流使切割电磁铁19进行励磁。此外,射束输送系统13的四极电磁铁46、47、49和50以及偏转电磁铁41~44也如上所述通过与220MeV对应的励磁电流进行励磁。此时,切割电磁铁19以及设置在射束输送系统13的各电磁铁的励磁量是图25的最下方的特性中从左开始第2个励磁量。

[0235] 对扫描电磁铁进行控制,对所设定的层内的离子束的照射位置进行设定(步骤S15)。照射位置控制装置89在从电磁铁控制装置85输入了各电磁铁的励磁量的调节结束信号时,根据治疗计划数据中包含的设定的层内的照射位置的信息,控制向各扫描电磁铁51和52供给的励磁电流,使各扫描电磁铁51和52产生偏转磁场以便向目标即该照射位置照射离子束。扫描电磁铁51产生的偏转磁场在y方向上,在后述的步骤S16的工序中对从加速器4出射的离子束的位置进行控制。扫描电磁铁52产生的偏转磁场在与y方向正交的x方向上,对从加速器4出射的离子束的位置进行控制。

[0236] 在步骤S15中,照射位置控制装置89在判定为对向各扫描电磁铁51和52供给的励磁电流进行了控制使得离子束到达作为目标的照射位置时,输出射束照射开始信号。

[0237] 向入射用电极施加电压(步骤S16)。入射用电极控制装置83在从照射位置控制装置89输入了射束照射开始信号时,与步骤S4同样地,对电源80进行控制,向入射用电极18施加电压。从离子源3经过离子入射管3A向射束环绕区域76入射的离子通过入射用电极18向水平方向弯曲,在中间面77内环绕,并且通过施加了高频电压的高频加速电极9A~9D被加速。沿着220MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78进行环绕的离子束进入在步骤S14中进行了励磁的一对磁极32A、32B相互间形成的射束通道35。进入了该射束通道35的离子束由于励磁的一对磁极32A、32B的作用从环绕的射束环绕轨道78被射出。即,该离子束从该射束环绕轨道78脱离。之后,该离子束离开该射束环绕轨道78向射束出射路径20的入口移动,通过切割电磁铁19的作用经过射束出射路径20从加速器4出射到射束路径48。到达照射装置7的离子束通过扫描电磁铁51和52的作用照射到所设定的层内的作为目标的照射位置。

[0238] 照射到目标照射位置的离子束的位置通过射束监视器53进行测定,根据测定出的

该位置确认离子束照射到目标照射位置。

[0239] 判定在照射位置的照射剂量是否与目标剂量一致(步骤S17)。通过剂量监视器54测定向目标照射位置的照射剂量。向剂量判定装置91输入测定出的照射剂量。剂量判定装置91判定向目标照射位置进行照射而测定出的照射剂量是否达到了目标照射剂量。在测定出的照射剂量与目标照射剂量不一致时,步骤S17的判定为“否”,重复实施步骤S16和步骤S17的各工序,继续进行向目标照射位置照射离子束直到所测定的照射剂量与目标照射剂量一致为止。在测定出的照射剂量与目标照射剂量一致时(步骤S17的判定为“是”时),剂量判定装置91向入射用电极控制装置83输出射束出射停止信号。

[0240] 停止向入射用电极施加电压(步骤S18)。入射用电极控制装置83在从剂量判定装置91输入了射束出射停止信号时,对电源80进行控制来停止从电源80向入射用电极18施加电压。结果,从离子源3向射束环绕区域76的质子入射停止,从加速器4向射束路径48的离子束出射停止。即,向患部的离子束照射停止。

[0241] 判定向所设定的层内的离子束的照射是否结束(步骤S19)。在向某个照射位置的离子束照射结束时,层判定装置92判定向所设定的层内的离子束照射是否结束。在其判定结果为“否”时,即,向所设定的层内的离子束照射没有结束时,重复实施步骤S15~S19的各工序。在重复后的步骤S15中,对向各扫描电磁铁51和52供给的励磁电流进行控制使得向所设定的层内的作为目标的其他照射位置照射离子束。

[0242] 在步骤S16中向该其他的照射位置照射离子束,在步骤S17的判定成为“是”时,在步骤S17中停止向入射用电极18施加电压。

[0243] 在步骤S19的判定成为“是”时,判定向全部层的离子束的照射是否已结束(步骤S20)。层判定装置92判定向全部层的离子束的照射是否已结束。因为剩余有没有进行离子束照射的层,所以步骤S20的判定为“否”,重复依次执行步骤S12~S14、S7以及S15~S20的各工序。在步骤S12中,设定位于第2深的位置的层。向该层照射的离子束所需要的能量为219MeV。

[0244] 在重复后的步骤S13中,与上述的220MeV的离子束移动的射束环绕轨道78相吻合的其他各磁极32A、32B的入射用电极18侧的角与之前的步骤S13同样地,被定位在219MeV的离子束的射束环绕轨道78中。此时的无质量切割板12的移动量比将磁极32A、32B定位在上述220MeV的离子束移动的射束环绕轨道78时的移动量大。在步骤S14中使这些其他的磁极32A、32B励磁。

[0245] 在步骤S15和S16中,在向入射用电极18施加了电压时,离子束沿着各射束环绕轨道78环绕,通过进行了励磁的其他磁极32A、32B的作用,219MeV的离子束从219MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78被射出。被射出的离子束从照射装置7照射到患部的第2深的层的照射位置。在步骤S17的判定成为“是”时,执行步骤S18停止向该照射位置照射离子束。

[0246] 在步骤S19的判定为“否”时,重复进行步骤S15~S19的各工序直至步骤S15~S19的判定成为“是”为止。在步骤S19的判定为“否”时,重复依次执行步骤S12~S14、S7以及S15~S20的各工序直至步骤S20的判定成为“是”为止。在重复进行步骤S12~S14、S7和S15~S20的各工序时,在步骤S12中设定更浅的层,到达该层的离子束的能量也依次降低(例如,从220MeV开始,将能量每次降低1MeV)。在步骤S13和S14中,将无质量切割板12的相对的一对磁极32A、32B定位在这些能量低的离子束环绕的射束环绕轨道78,之后使这些磁极励磁。

在从加速器4出射180MeV和160MeV的离子束时,与出射220MeV和200MeV的各离子束时进行励磁的一对磁极32A、32B在入射用电极18侧相邻的另一对磁极32A、32B在步骤S14中分别进行励磁。但是,在出射160MeV的离子束时,与出射180MeV的离子束的情况相比,步骤13中的磁极定位时的无质量切割板12的移动量变大。

[0247] 在步骤S20的判定成为“是”时,结束向患部照射离子束(步骤S21)。

[0248] 通过以上所述,通过照射离子束对患者56的患部的治疗结束。

[0249] 在本实施例中,铁芯14A、14B为适合在中间面77中形成最外周的射束环绕轨道的圆形,但即使是其他形状也能够实施。此外,环状线圈11A和11B也是圆形,但它们也可以是其其他形状,例如可以设为把在旁轭的底座部形成的各磁极包围的四叶(Cloverleaf)形状。

[0250] 在一般的回旋加速器中,只能从在最外周形成的具有最高能量的离子束的射束环绕轨道取出离子束。但是,根据本实施例,在加速器外周部形成射束轨道间隔变窄的射束轨道偏心区域,由此在切割电磁铁19以及射束出射路径20的入口聚集地形成具有不同能量的多个射束轨道78,因此不仅能够从位于最外周的最高能量的离子束环绕的射束轨道78,还能够从在该射束环绕轨道76的内侧形成的多个射束环绕轨道78随时有选择性地取出具有不同能量的各离子束。因此,在本实施例中,能够从加速器4高效地出射能量不同的各离子束。

[0251] 根据本实施例,中心相互偏心的多个环状的射束环绕轨道78在入射用电极18或离子注入口或离子入射部109与射束出射路径20的入口之间变得密集,在以入射用电极18为基点与射束出射路径20的入口 180° 相反侧这些环状的射束环绕轨道78彼此的间隔变宽的轨道偏心区域在入射用电极18(或离子注入口或离子入射部109)的周围,在存在于射束环绕区域76内形成射束环绕轨道78的中间面77上形成,因此,在射束环绕轨道偏心区域内的以入射用电极18为基点与射束出射路径20的入口 180° 相反侧,具有不同能量的各离子束的各射束环绕轨道78彼此的间隔变宽,能够高效地使不同能量的各离子束从相应的射束环绕轨道78脱离。因此,能够使能量不同的各离子束经过在加速器4的切割电磁铁19形成的射束出射路径20高效地出射到射束输送系统13的射束路径48。并且,在本实施例中,能够分别连续地从加速器4出射能量不同的各离子束。

[0252] 在本实施例中,形成以入射用电极18为中心的同心多个环状射束环绕轨道78的轨道同心区域在中间面77形成在轨道偏心区域的内侧,因此出射离子束的射束出射路径20的入口附近的射束环绕轨道78的聚集程度缓和,结果,该入口附近的磁场梯度变得更小。具有不同能量的各离子束能够更稳定地在相应的射束环绕轨道78中进行环绕。

[0253] 离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)配置在与环状线圈的重心在径向上不同的位置,因此关于在离子入射部(或入射用电极18或离子注入口)周围形成的多个环状的射束环绕轨道78相邻的相互间隔,与相对于离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)靠近射束出射路径20的入口侧的区域相比,在以离子入射部(或入射用电极18或离子注入口)为基点与射束出射路径20的入口相反侧的区域变宽。因此,在相邻的射束环绕轨道78彼此的间隔变宽的与射束出射路径20的入口相反侧的区域中能够使离子束容易地从射束环绕轨道78脱离,能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道78中环绕的能量不同的各离子束。

[0254] 离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)配置在与铁芯的中心在径向上不

同的位置,因此关于在离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)的周围形成的多个环状的射束环绕轨道78相邻的相互间隔,与相对于离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)靠近射束出射路径20的入口侧的区域相比,在以离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)为基点与射束出射路径20的入口相反侧的区域变宽。因此,在相邻的射束环绕轨道78彼此的间隔变宽的与射束出射路径20的入口相反侧的区域中能够使离子束容易地从射束环绕轨道78脱离,能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道78中环绕的能量不同的各离子束。

[0255] 高频加速电极9C和9D的从其内面位置向环状线圈的内侧延伸的各个部分的前端部配置在与环状线圈的重心在径向上不同的位置,因此关于在配置有高频加速电极9C和9D各自的前端部的该位置的周围形成的多个环状的射束环绕轨道78相邻的相互间隔,与相对于离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)靠近射束出射路径20的入口侧的区域相比,在以离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)为基点与射束出射路径20的入口相反侧的区域变宽。因此,在相邻的射束环绕轨道78彼此的间隔变宽的与射束出射路径20的入口相反侧的区域中能够使离子束容易地从射束环绕轨道78脱离,能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道78中环绕的能量不同的各离子束。

[0256] 磁极(凸部)7A~7F被设置为向着与铁芯的重心在径向上不同的位置,从铁芯外周向径内周方向延伸,因此关于在配置磁极7A~7F各自的前端部的与铁芯的重心在径向上不同的位置的周围形成的多个环状的射束环绕轨道78相邻的相互间隔,与相对于离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)靠近射束出射路径20的入口侧的区域相比,在以离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)为基点与射束出射路径20的入口相反侧的区域变宽。因此,在相邻的射束环绕轨道78彼此的间隔变宽的与射束出射路径20的入口相反侧的区域中能够使离子束容易地从射束环绕轨道78脱离,能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道78中环绕的能量不同的各离子束。

[0257] 根据本实施例,多个射束环绕轨道78在射束出射路径20的入口聚集,因此从各射束环绕轨道78脱离的能量不同的各离子束容易入射到射束出射路径20的入口,能够高效地出射能量不同的各离子束。

[0258] 根据本实施例,通过磁极7A~7F形成的环状的射束环绕轨道78的中心与环状线圈的重心位置不同,因此关于在离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)的周围形成的多个环状的射束环绕轨道78相邻的相互间隔,与射束出射路径20的入口侧的区域相比在环状的射束环绕轨道78的中心侧的区域变宽。因此,在相邻的射束环绕轨道78彼此的间隔变宽的射束环绕轨道78的中心侧的区域中能够使离子束容易地从射束环绕轨道78脱离,能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道78环绕的能量不同的各离子束。

[0259] 根据本实施例,在第1磁场区域中与最外周的射束环绕轨道78相比在离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)侧形成中间面77内磁场强度最高的区域,因此能够高效地出射能量不同的各离子束,并且,在中间面77形成的环状的多个射束环绕轨道78中的位于外周部的射束环绕轨道中环绕的离子束的稳定性提高。

[0260] 根据本实施例,一对铁芯14A、14B在离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)的周围分别从离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)放射状地延伸,形成前端与离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)相对的磁极7A~7F,并且,在离子入射部

109(或入射用电极18或离子注入口)的周围形成从离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)放射状地延伸的凹部29A~29F,在离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)的周围交替地配置磁极和凹部,环状线圈11A、11B包围在铁芯14A、14B内分别配置的磁极7A~7F和凹部29A~29F,因此能够稳定地进行经过离子入射管3A向射束环绕区域76的离子入射。

[0261] 在本实施例中,在凹部29D(第2凹部)射束出射路径20的入口开口,因此从环状的射束环绕轨道78脱离的离子束容易向射束出射路径20的入口入射,能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道78环绕的能量不同的各离子束。这是因为在轨道偏心区域内形成的各个环状的射束环绕轨道78在凹部29A聚集在射束出射路径20的入口侧。

[0262] 在本实施例中,磁极7A~7F分别具有弯曲点,从磁极7A~7F的各弯曲点到与环状线圈的内面相对的端面为止的部分向凹部29A弯曲,因此形成偏心的多个射束环绕轨道78所在的射束偏心区域,射束环绕轨道相互间的间隔变宽,能够高效地出射在各环状的射束环绕轨道78环绕的能量不同的各离子束。

[0263] 在本实施例中,将射束电流测定装置98配置在凹部29A,因此通过该射束电流测定装置98的测定,能够得到在各射束环绕轨道78中环绕的各离子束的能量以及各射束环绕轨道78在环状线圈的半径方向上的位置的各个信息。通过使用各离子束的能量信息以及各射束环绕轨道78的位置信息,能够得到与向患处中包含的设定的层照射的离子束的能量对应的射束环绕轨道78的位置信息,根据该位置信息,能够确定无质量切割板12的应励磁的相对的一对磁极32A、32B,能够将该应励磁的相对的一对磁极32A、32B高精度地定位在向设定的层照射的能量的离子束环绕的射束环绕轨道78中。

[0264] 此外,使用移动装置17A使射束电流测定装置98的射束电流测定部15在凹部29A内沿中间面77向离子入射部109(或入射用电极18或离子注入口)移动,因此能够在广范围内得到与各射束环绕轨道78对应的各离子束的能量信息以及各射束环绕轨道78的位置信息。

[0265] 当配置在凹部29A的射束电流测定装置98测定出的射束环绕轨道78的位置不在预定位置时,通过线圈电流控制装置94调节向在各磁极7A~7F上分别安装的调整线圈8A~8F分别供给的励磁电流,因此即使在形成了不是位于预定位置的射束环绕轨道78时,也能够预定位置形成该射束环绕轨道78。

[0266] 在本实施例中,如上所述,在一对各铁芯14A、14B中,在垂直于中心轴C的平面内在一点划线X两侧的各区域,将前端与入射用电极18相对的高频加速电极9C配置于在真空容器27的周向上相邻的磁铁7C和磁极7E之间,将前端与入射用电极18相对的高频加速电极9D配置于在真空容器27的周向上相邻的磁铁7D和磁极7F之间,从高频加速电极9C的弯曲点24M、24N到高频加速电极9C的与环状线圈11A或11B相对的端面为止的部分以及从高频加速电极9C的弯曲点24M、24N到高频加速电极9C的与环状线圈11A和11B中的某个环状线圈相对的端面为止的部分向凹部29A弯曲,因此能够容易对靠近入射用电极18的射束环绕轨道78与靠近环状线圈11A或11B的射束环绕轨道78之间存在的各射束环绕轨道78中环绕的各离子束进行加速。并且,在本实施例中,在磁极7A与磁极7C之间以及磁极7B与磁极7D之间,在这些磁极的弯曲点和与环状线圈11A和11B中某个环状线圈相对的端面之间分别配置了高频加速电极9A和9B,因此还能够容易对具有高能量的离子束的各射束环绕轨道78中环绕的各离子束进行加速。

[0267] 在本实施例中,在中间面77内在凹部29A配置射束电流测定部15,使该射束电流测定部15通过移动装置17在中间面77中沿一点划线X移动,通过位置检测装置39检测移动的射束电流测定部15在中间面77内的位置,因此如上所述,能够高精度地检测各射束环绕轨道78中的射束电流值以及这些射束环绕轨道78的位置。

[0268] 将无质量切割板12配置在一对铁芯14A、14B的各凹部29A内,因此能够容易地将无质量切割板12配置在铁芯14A与铁芯14B之间。

[0269] 将无质量切割板12配置在凹部29A,因此无质量切割板12位于射束环绕轨道偏心区域内的射束环绕轨道78相互的间隔变宽的位置,通过无质量切割板12能够使具有不同能量的各离子束高效地从各射束环绕轨道78脱离。由此,能够从加速器4高效地出射能量不同的各离子束。

[0270] 无质量切割板12具有多对相对的磁极32A、32B,因此能够根据向患部的设定的层照射的离子束的能量,容易地确定定位在射束环绕轨道78中应励磁的一对磁极32A、32B。

[0271] 设有使无质量切割板12在环状线圈的半径方向上移动的移动装置17,因此能够进行调节从而将无质量切割板12的应励磁的一对磁极32A、32B向具有应向患部的设定的层进行照射的能量的离子束所环绕的射束环绕轨道78进行定位。因此,能够高精度地进行一对磁极32A、32B向相应的射束环绕轨道78的定位。

[0272] 使用回旋加速器的粒子束照射装置为了改变向患部照射的离子束的能量,在射束输送系统中设置了具有厚度不同的多个金属板的降能器。与此相对,本实施例的粒子束照射装置1如上所述能够从加速器4出射能量不同的离子束,不需要降能器。或者,能够大幅度降低降能器的使用。因此,在粒子束照射装置1中,能够防止以下情况:降能器导致的离子束的射束尺寸的增大、在透射降能器的金属板时一部分离子散射导致的离子数的减少、以及降能器的放射化导致的放射性废弃物的增加。

[0273] 在本实施例中,为了将离子束环绕的射束环绕区域76保持真空,使一对铁芯14A和铁芯14B彼此相对地结合来形成真空容器27。因此,在本实施例中使用的加速器4如后述的实施例8以及9那样,与在相互相对的铁芯14A与铁芯14B之间配置真空容器而构成的加速器相比能够实现小型化。

[0274] 在本实施例中,如上所述,在能量低的离子束(70MeV以下的离子束)环绕的射束环绕轨道78中,离子束通过2台高频加速电极9C和9D被加速。此外,射束环绕轨道78偏心,因此在需要稳定且细致的轨道控制,并且因为是高能量进一步的加速需要高的高频加速电压或长的加速时间的、能量高的离子束(超过70MeV的离子束)环绕的射束环绕轨道78中,离子束通过4台高频加速电极9A~9D被加速。

[0275] 在磁极的弯曲点与环状线圈的内面之间配置的高频加速电极以及从离子注入口向环状线圈的内面延伸的高频加速电极无论是各为1个还是各为3个以上,都能够发挥上述的功能。但是,为了在射束环绕区域76内的轨道面即中间面77形成上述的轨道偏心区域,使高频加速电极9A~9D中的高频加速电极9A和9C的配置以及形状相对于连结中心轴C与射束出射路径20的入口的直线(一点划线X)与高频加速电极9B和9D的配置以及形状对称,从而容易获得环绕的离子束的稳定性。

[0276] 铁芯14A、14B在水平方向上为圆形,一般其中心表示加速器4的构造上的中心。此外,环状线圈11A以及11B为圆形的主线圈,一般其中心以及重心同样表示加速器4的构造上

的中心。并且,在本实施例的加速器4中,上述的离子入射部设置在与铁芯的中心和环状线圈的重心都不同的位置,设置在向射束出射路径20的入口侧偏移的位置。

[0277] 在为通常的回旋加速器时,以加速器的构造上的中心为起点,同心圆状地形成射束环绕轨道,因此离子入射到加速器的构造上的中心。严格地讲,离子并不是入射到中心点本身,而是入射到最内周的射束环绕轨道。假设将射入离子将该离子导入到最内周的射束环绕轨道的与最内周的射束环绕轨道相比内侧的区域定义为离子入射部时,在通常的回旋加速器中,该离子入射部位于加速器的构造上的中心。与此相对,在本实施例所使用的加速器4中,离子入射部设置在与铁芯的中心和环状线圈的重心都不同的位置,配置在向射束出射路径20的入口侧偏移的位置。

[0278] 实施例2

[0279] 以下,使用图27对作为本发明的另一优选实施例的实施例2的粒子束照射装置进行说明。

[0280] 本实施例的粒子束照射装置1A具备加速器4A,具有将实施例1的粒子束照射装置1中的加速器4更改为加速器4A的结构。粒子束照射装置1A的其他结构与粒子束照射装置1相同。

[0281] 加速器4A具有包含旁轭5A、5B的真空容器27。这些旁轭5A、5B与实施例1的旁轭5A、5B实质相同。对在加速器4A中使用旁轭5B进行说明。旁轭5B也具有磁极7A~7F这6个磁极以及高频加速电极9A~9D这4个高频加速电极,并形成了6个凹部29A~29F。磁极7A~7F以及高频加速电极9A~9D被配置在环状线圈11B的内侧。与加速器4同样地,在各磁极7A~7F之间将各个凹部29A~29F各配置一个。加速器4A中的高频加速电极9A~9D的配置与加速器4中的高频加速电极9A~9D的配置相同。

[0282] 在加速器4A中,在与加速器4的旁轭5B相比向射束出射路径20的入口侧进行了移动的状态下配置离子注入口以及入射用电极18。随着入射用电极18向射束出射路径20的入口侧的移动,离子入射管3A也移动至入射用电极18的位置而设置在旁轭5A。在加速器4A的旁轭5B形成的吸引管26也在该离子入射管3A的延长线上被安装在加速器4A的旁轭5B。

[0283] 磁极7A~7F以及高频加速电极9C和9D的各弯曲点24A~24P被配置在与加速器4相比的内侧,并配置在10MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78上,该10MeV的离子束环绕的射束环绕轨道78在入射用电极18周围形成。磁极7A~7F以及高频加速电极9C和9D各自的前端是尖的,与入射用电极18相对。磁极7A~7F以及高频加速电极9C和9D与图3所示的这些磁极的形状相同,从各弯曲点向前端变细。磁极7A~7F以及高频加速电极9C和9D的各弯曲点至与各个环状线圈11B的内面相对的端面为止的长度比在实施例1的加速器4中使用的旁轭5B中的各磁极的长度长。配置在与磁极7A~7D的各弯曲点相比环状线圈11B的内面侧的高频加速电极9A和9B各自的长度比在加速器4中使用的高频加速电极9A和9B各自的长度稍长。

[0284] 因此,在加速器4A中使用的旁轭5B内以入射用电极18为中心形成的轨道同心区域比加速器4中的该区域小。相反,在轨道同心区域周围形成的轨道偏心区域比加速器4中的该区域大。

[0285] 在加速器4A的旁轭5A中,具有与加速器4A的旁轭5B同样形状的磁极7A~7F以及高频加速电极9A~9D。在加速器4A中,除了磁极7A~7F和高频加速电极9A~9D各自的形状以

及配置入射用电极18、离子入射管3A和吸引管26的位置以外,包含无质量切割板12具有与加速器4相同的结构。

[0286] 本实施例的粒子束照射装置1A也实施由粒子束照射装置1实施的步骤S1~S6、S23、S24、S7~S14、S7以及S15~S21的各工序,对治疗台55上的患者56的患部照射离子束。

[0287] 本实施例能够得到在实施例1中产生的各个效果。

[0288] 实施例3

[0289] 以下,使用图28对作为本发明的另一优选实施例的实施例3的粒子束照射装置进行说明。

[0290] 本实施例的粒子束照射装置1B与实施例1的粒子束照射装置1的不同点在于射束输送系统以及加速器4的旋转装置。粒子束照射装置1B的加速器4、照射装置7以及控制系统65与粒子束照射装置1相同。

[0291] 在实施例1和2中,加速器4和4A水平配置,真空容器27的旁轭5B的下表面被设置在建筑物的地面上。本实施例的粒子束照射装置1B具有在地面上可旋转地设置的旋转框,将垂直配置的加速器4安装在该旋转框上。该旋转框具有与日本专利第3472657号公报所记载的旋转框相同的结构,通过设置在建筑物地面上的支承装置上所设置的旋转的辊来支承该旋转框。该支承装置与具有同步加速器的以往的粒子束照射装置中所设置的具有用于支承旋转台架的多个辊的支承装置(参照日本特开2006-239403号公报)相同。在支承装置上设置的辊中的至少一个辊通过旋转装置(例如电动机)进行旋转。通过辊的旋转,旋转框旋转,并且加速器4以真空容器27的中心轴C为中心进行旋转。由于垂直地配置加速器4,在真空容器27内形成的中间面77也相对于地面垂直。

[0292] 治疗室被放射线屏蔽墙(未图示)包围,该放射线屏蔽墙与日本专利第3472657号公报所记载的放射线墙的结构相同。放射线屏蔽墙的一部分成为侧壁,被配置在安装在旋转框上的加速器4与治疗室之间。将承载进行治疗的患者56的治疗台55设置在治疗室内。

[0293] 在设置在真空容器27中的切割电磁铁19内形成的射束出射路径20所连接的射束输送系统13B的射束路径48在真空容器27的外侧向其半径方向延伸不久后向水平方向弯曲,沿着成为治疗室的天花板部分的放射线屏蔽墙延伸至治疗室正上方。射束路径48在治疗室正上方向治疗室延伸并弯曲。偏转电磁铁95、96被配置在射束路径48的弯曲部,在该射束路径48中设有多个四极电磁铁97。在射束路径48的前端部安装有照射装置7。与实施例1的粒子束照射装置1同样地,在照射装置7上安装有2台扫描电磁铁51、52、射束位置监视器53和剂量监视器54。

[0294] 在向躺在治疗室内的治疗台55上的患者56的癌患部照射离子束来进行患部的治疗时,在质子线治疗装置1B中,也实施在实施例1中实施的步骤S1~S6、S23、S24、S7~S14、S7和S15~S21的各工序。尤其在使用质子线治疗装置1B时的步骤S11的工序中,使旋转框旋转而使加速器4旋转。此时,射束输送系统13B和照射装置7围绕加速器4的旋转中心(中心轴C)旋转。通过这样的照射装置7的环绕使照射装置7的射束轴与向患部的离子束照射方向一致。此时,治疗台55上的患者56的患部位于加速器4的旋转中心的延长线上。

[0295] 通过实施步骤S11~S14、S7和S15~S21的各工序,进行向患部的离子束的照射,实施患部的治疗。

[0296] 本实施例能够得到在实施例1中产生的各效果。并且,在本实施例中,将加速器4垂

直配置并通过旋转框使其旋转,因此与实施例1的粒子束照射装置1相比更加小型化。

[0297] 实施例4

[0298] 以下,使用图29和图20对作为本发明的另一优选实施例的实施例4的粒子束照射装置进行说明。

[0299] 本实施例的粒子束照射装置1C具有在粒子束照射装置1中将离子束产生装置2替换为离子束产生装置2A的结构。此外,离子束产生装置2A具有在离子束产生装置2中将加速器4替换为加速器4B的结构。加速器4B具有在加速器4中删除无质量切割板12、移动装置17和电源40,并追加了能量吸收体62和移动装置60的结构。另外,在粒子束照射装置1C中所使用的控制系统65A具有将控制系统65的加速器/输送系统控制装置69替换为加速器/输送系统控制装置69A的结构。加速器/输送系统控制装置69A具有在加速器/输送系统控制装置69中将无质量切割板控制装置86替换为能量吸收体控制装置93的结构。能量吸收体控制装置93分别与CPU67、存储器107和照射位置控制装置89连接。加速器/输送系统控制装置69A的其他结构与加速器/输送系统控制装置69相同。此外,粒子束照射装置1C的其他结构与粒子束照射装置1相同。在图29和图30中虽然未图示,但在粒子束照射装置1中使用的包含射束电流测定部15、操作部件16A、移动装置17和位置检测器39的射束电流测定装置98在粒子束照射装置1C中也使用。该射束电流测定装置98与粒子束照射装置1同样地安装在真空容器27。射束电流测定部15和操作部件16A在凹部29A中被配置在中间面77。

[0300] 能量吸收体62在真空容器27内配置在旁轭5A的磁极7A与旁轭5B的与旁轭5A的磁极7A相对的磁极7A之间,被安装在棒状的操作部件63的前端部。能量吸收体62为铝薄板,被配置成相对于射束环绕轨道78垂直。能量吸收体62也可以由钨、铜和钛等非磁性材料的金属材料或非金属材料构成,从而取代铝。能量吸收体62在与中间面77垂直的方向上的宽度比旁轭5A的磁极7A与旁轭5B的磁极7A之间的间隙小。

[0301] 安装在能量吸收体62的操作部件63贯穿真空容器27并延伸至真空容器27的外部。操作部件63也是能量吸收体62的支承部件,在真空容器27的外部与具有活塞和缸体的移动装置60的活塞连接。操作部件63被配置在上述相对的磁极29A之间以及环状线圈11A与环状线圈11B之间,例如,贯穿旁轭5B的筒状部75B可滑动地安装在筒状部75B上。检测能量吸收体62在真空容器27内的位置的位置检测器61被安装在移动装置60上(参照图29)。移动装置60可以是电动机。在作为移动装置60使用电动机时,作为位置检测器38使用编码器,将该编码器与电动机的旋转轴相连接。能量吸收体62、操作部件63、移动装置60以及位置检测器61构成作为射束脱离装置一种的射束取出调整装置。

[0302] 在粒子束照射装置1C中,实施在实施例1中叙述的步骤S1~S6、S23、S24以及S7~S10的各工序中的除了步骤S8和S9的各工序以外的各工序。并且,在步骤S7与步骤S10间,代替步骤S8和S9,实施后述的步骤S22(参照图32)的工序。在后面详细说明步骤S22的工序。

[0303] 在向治疗台55上的患者56的患部照射离子束来进行患部的治疗的情况下,实施图32所示的步骤S11、S12、S22、S7以及S15~S21的各工序。与实施例1同样地实施步骤S22以外的各工序。在此,对步骤S22的工序进行说明。

[0304] 对能量吸收体进行定位(步骤S22)。为了实施步骤S22的工序,能量吸收体控制装置93根据来自CPU67的控制指令信息对移动装置60进行控制,通过移动装置60使操作部件63移动,由此使能量吸收体62在中间面77向真空容器27的中心轴C移动。通过这样的能量吸

收体62的移动,能量吸收体62至少能够横穿70MeV~250MeV的各离子束环绕的各射束环绕轨道78。

[0305] 能量吸收体控制装置93根据位置检测装置39测定出的与存储器107中存储的能量相对应的射束环绕轨道78的位置信息,确定基于从照射位置控制装置89输入的向步骤S12中设定的层照射的离子束的能量信息以及能量吸收体62导致的能量衰减程度比应向该层照射的离子束的能量高一些的能量的离子束环绕的射束环绕轨道78的位置。能量吸收体控制装置93通过控制所确定的移动装置60,使能量吸收体62移动至所确定的该射束环绕轨道78的位置,定位在该射束环绕轨道78。

[0306] 通过位置检测器61测定能量吸收体62在中间面77的半径方向上的位置(真空容器27内的半径方向上的位置)。由位置检测器61测定出的能量吸收体62的位置信息被输入到能量吸收体控制装置93中。能量吸收体控制装置93判定测定出的能量吸收体62的位置信息是否与确定的该射束环绕轨道78的位置一致,在不一致的情况下,通过能量吸收体控制装置93对移动装置60进行控制,使能量吸收体62移动至该射束环绕轨道的位置。在测定出的能量吸收体62的位置信息与相应的射束环绕轨道的位置一致时,通过能量吸收体控制装置93停止移动装置60的驱动。

[0307] 在通过能量吸收体控制装置93进行的移动装置60的控制,使能量吸收体62位于上述确定的射束环绕轨道78的位置时,在步骤S16中向射束环绕区域76入射离子后,在所确定的位置的射束环绕轨道78中环绕的离子束在经过该能量吸收体62时能量衰减。结果,能量衰减的离子束实质上相对于平衡轨道位于外侧。并且,在移动至射束出射路径20的某个凹部29D的期间,该射束进行自由振荡,向射束出射路径20的入口移动。结果,经过能量吸收体62后的离子束经过射束出射路径20从加速器4B出射至射束输送系统13的射束路径48。

[0308] 在根据治疗计划数据向患部的某个层照射的离子束为200MeV的情况下,需要从加速器4B向射束路径48出射200MeV的离子束。需要使经过了能量吸收体62的离子束的能量为200MeV,在该情况下,考虑能量吸收体62引起的能量衰减时,需要使205MeV离子束透射能量吸收体62。在该情况下,使能量吸收体62位于205MeV的离子束环绕的射束环绕轨道。

[0309] 在步骤S20的判定为“否”时,重复实施步骤S11、S12、S22、S7以及S15~S20的各工序直到步骤S20的判定成为“是”为止。在该重复的过程中,在步骤S22进行上述那样的能量吸收体62的定位。

[0310] 本实施例能够得到实施例1中得到的各效果中的除了通过无质量切割板12产生的效果以外的其他各效果。在本实施例中,不需要复杂结构的无质量切割板12以及电源40,因此能够使粒子束照射装置1C的结构简化。

[0311] 设置了使能量吸收体62在环状线圈的半径方向上移动的移动装置17A,因此能够进行调节从而将能量吸收体62定位在具有应该向患部的设定的层进行照射的能量的离子束所环绕的射束环绕轨道78。因此,能够高精度地进行能量吸收体62向相应的射束环绕轨道78的定位。

[0312] 实施例5

[0313] 以下,使用图33和图34对作为本发明的另一优选实施例的实施例5的粒子束照射装置进行说明。

[0314] 本实施例的粒子束照射装置1D具有在粒子束照射装置1中将加速器4替换为加速

器4C的结构。加速器4C具有向加速器4追加了能量吸收体62、操作部件63以及移动装置60的结构。粒子束照射装置1C的其他结构与粒子束照射装置1相同。本实施例中所使用的加速器/输送系统控制装置69除了无质量切割板控制装置86以外还包括能量吸收体控制装置93。另外,因为使用了无质量切割板12,所以在本实施例中使用的能量吸收体62的厚度可以比实施例4中所使用的能量吸收体62的厚度薄。

[0315] 在粒子束照射装置1D中实施实施例1中叙述的步骤S1~S6、S23、S24以及S7~S10的各工序。并且,在使用粒子束照射装置1D向治疗台55上的患者56的患部照射离子束来进行患部的治疗的情况下,实施图35所示的步骤S11、S12、S22、S13、S14、S7以及S15~S21的各工序。步骤S22的工序与实施例4中实施的该工序相同。

[0316] 本实施例因使用无质量切割板12和能量吸收体62,步骤S16中的离子束的出射与实施例1和4不同,因此对步骤S16进行详细说明。

[0317] 能量吸收体62在离子束的环绕方向上配置在无质量切割板12之前。因此,某个能量的离子束因能量吸收体62能量衰减后,该能量衰减的离子束通过无质量切割板12被射出。通过能量吸收体62能量衰减的离子束与能量衰减前的离子束所环绕的射束环绕轨道相比向内侧移动。预先已知该离子束的移动量,因此在步骤S13的无质量切割板12的电极的定位中,考虑该移动量,如上所述通过移动装置17将与能量衰减前的离子束所环绕的射束环绕轨道相比位于内侧的相对的一对磁极32A、32B定位在透射了能量吸收体62的离子束的位置。

[0318] 因此,在步骤S16中向射束环绕区域76入射了离子后生成的离子束所环绕的射束环绕轨道中配置了能量吸收体62,从而经过了能量吸收体62的离子束能量衰减成为向患部的某个层进行照射的离子束的能量。经过了能量吸收体62的离子束进一步通过预先定位的无质量切割板12的进行了励磁的一对磁极32A、32B被射出。该被射出的离子束入射到射束出射路径20,并出射到射束输送系统13的射束路径48。

[0319] 本实施例能够得到在实施例1和4中产生的各效果。在本实施例中并用了无质量切割板12,因此能够使能量吸收体62的厚度比实施例4中使用的能量吸收体62的厚度薄。因此,由能量吸收体62引起的离子束的散射变少,相应地,从加速器4C向射束输送系统13出射的离子束增加。利用于患者56的治疗的离子束的利用效率增加。

[0320] 实施例6

[0321] 以下,使用图36、图37和图38对作为本发明的另一优选实施例的实施例6的粒子束照射装置进行说明。

[0322] 本实施例的粒子束照射装置1E具有在实施例1的粒子束照射装置1中将射束电流测定装置98替换为射束电流测定装置98A的结构。粒子束照射装置1E的其他结构与粒子束照射装置1相同。

[0323] 如图40和图41所示,射束电流测定装置98A具有电动机壳体101、多个电动机电极103A以及多个电动机电极103B。电动机壳体101具有彼此相对平行配置的壳体部102A和102B以及连接部102C。各电动机电极103A隔着预定间隔被配置成一列,经由多个(例如4个)绝缘子104被安装在壳体部102A的与壳体部102B相对的一面。各电动机电极103B隔着预定间隔被配置成一列,经由多个(例如4个)绝缘子104被安装在壳体部102B的与壳体部102A相对的一面。壳体部102A和102B的各端部通过连接部102C结合。各电动机电极103A被配置成

与各电动机电极103B一一相对。

[0324] 各电动机电极103A上分别连接电极引线106,各电动机电极103B上也分别连接不同的电极引线106。为了防止因真空容器27内的真空中的排气以及放电引起的损坏,与各电动机电极103A连接的电极引线106被捆绑,并被电极引线罩105A覆盖。电极引线罩105A沿壳体部102A的表面安装于该表面上。此外,为了防止因真空容器27内的真空中的排气以及放电引起的损坏,与各电动机电极103B连接的电极引线106也被捆绑,并被电极引线罩105B覆盖。电极引线罩105B沿壳体部102B的表面被安装在该表面。与各电动机电极103A连接的电极引线106以及与各电动机电极103B连接的电极引线106在连接部102C的位置被捆绑,并被电极引线罩(未图示)覆盖的状态下,贯穿旁轭5B的筒状部75B而被引出到真空容器27的外部。这些电极引线106与射束电流测定部控制装置84连接。

[0325] 如图38和图39所示,射束电流测定装置98A被配置在无质量切割板12的各磁极32A和与其相对的各磁极32B之间,被安装在无质量切割板12上。在本实施例中,无质量切割板12被配置于在相对的各旁轭5A、5B形成的凹部29A内。因此,射束电流测定装置98A也被配置在这些凹部29A内。在各电动机电极103A与各电动机电极103B之间,形成环绕的离子束经过的间隙即射束通道35。该射束通道35包括中间面77的一部分。各电动机电极103A与各电动机电极103B在中间隔着中间面77而相对。电动机壳体101长度长于无质量切割板12的长度,在电动机壳体101设有多个电动机电极103A以及多个电动机电极103B使得例如能够在从35MeV的离子束的射束环绕轨道78至250MeV的离子束的射束环绕轨道78的范围内测定射束电流。

[0326] 本实施例的粒子束照射装置1E也实施由粒子束照射装置1实施的步骤S1~S6、S23、S24、S7~S14、S7以及S15~S21的各工序,对治疗台55上的患者56的患部照射离子束。具体说明这些工序中的在本实施例中实施的步骤S6(离子束的测定)。在本实施例中,使用射束电流测定装置98A来实施步骤S6。在实施步骤S1~S5的各工序后,使用移动装置17来调节无质量切割板12的位置,进行调节使射束电流测定装置98A的电动机电极103A和103B沿着一点划线X成为预定位置。在各射束环绕轨道78环绕的各离子束经过射束通道35。在离子束经过相对的电动机电极103A与103B之间时,测定在这些电极间产生的电压。将相当于射束电流的该测定出的电压信息变换成射束电流,将与该射束电流对应的各能量信息与这些电动机电极在环状线圈的半径方向的一点划线X上的位置信息,即射束环绕轨道78在该半径方向上的位置信息对应起来存储到存储器107中。

[0327] 在步骤S13中,无质量切割板控制装置86根据向所设定的层照射的离子束的能量信息以及在存储器107中存储的与能量(电压信息)对应的射束环绕轨道78的位置信息,确定定位在相应的射束环绕轨道78来进行励磁的一对磁极32A、32B。并且,与实施例1的步骤S13同样地,求出无质量切割板12的移动量。无质量切割板控制装置86根据该移动量对移动装置17进行控制,使无质量切割板12向入射用电极18移动,将所确定的磁极32A、32B定位到相应的射束环绕轨道78。并且,在步骤S14中,对所确定的一对磁极32A、32B进行励磁。

[0328] 本实施例能够得到在实施例1中产生的各效果。

[0329] 在实施例1中使用的射束电流测定装置98使环绕的离子束与射束电流测定部15碰撞来检测射束电流。因此,在破坏环绕的离子束来进行测量的方面,需要使射束电流测定部15移动的移动装置17A。为了测量在位于最外周的射束环绕轨道78环绕的离子束的射束电

流,需要将射束电流测定部15拉出到环状线圈11A、11B的内面附近,有可能必须使操作部件16A变长。因此,造成射束电流测定装置98的大型化。

[0330] 本实施例中使用的射束电流测定装置98A利用相对的电动机电极103A、103B测定相当于离子束的射束电流的上述电压,因此能够不破坏环绕的离子束而测定该电压,能够求出与电压对应的射束电流。此外,为了对电动机电极103A、103B的位置进行微调,能够使用无质量切割板12的移动装置17,因此,射束电流测定装置98A与射束电流测定装置98相比能够更加小型化。

[0331] 另外,配置在无质量切割板12内的射束电流测定装置98A也可以如后述的实施例7那样,使用棒状的支承部材108而固定在旁轭5B的筒状体75B。在该情况下,安装在射束电流测定装置98A的支承部材108经过在无质量切割板12的连接部31形成的贯穿孔31D到达无质量切割板12的外部。

[0332] 实施例7

[0333] 以下,使用图42和图43对作为本发明的另一优选实施例的实施例7的粒子束照射装置进行说明。

[0334] 本实施例的粒子束照射装置1F具有在实施例4的粒子束照射装置1C中将射束电流测定装置98替换为上述的射束电流测定装置98A的结构。粒子束照射装置1F的其他结构与粒子束照射装置1C相同。在粒子束照射装置1F中,射束电流测定装置98A沿着经过中心轴C且垂直于中心轴C的一点划线X配置于在各个旁轭5A、5B形成的凹部29A中,通过棒状的支承部材108被安装在旁轭5B的筒状部75B。形成射束环绕轨道78的中间面77的一部分存在于在射束电流测定装置98A形成的射束通道35内。各电动机电极103A和各电动机电极103B在中间隔着中间面77而相对。

[0335] 在本实施例中,与实施例4同样地,执行在实施例1中叙述的步骤S1~S6、S23、S24以及S7~S10的各工序中的除了步骤S8和S9的各工序以外的各工序,并且,实施图35所示的步骤S11、S12、S22、S7以及S15~S21的各工序。

[0336] 在本实施例中,在步骤S6,与实施例6同样地,在离子束环绕时,使用射束电流测定装置98A测定相对的电动机电极103A与电动机电极103B之间的电压。并且,在步骤S22中,根据存储器107中存储的与射束电流信息即电压信息相对应的该位置信息,确定基于向设定的层照射的离子束的能量信息以及能量吸收体62导致的能量衰减程度比应向该层照射的离子束的能量高一些的能量的离子束环绕的射束环绕轨道78的位置。能量吸收体控制装置93通过对移动装置60进行控制,使能量吸收体62移动至该确定的该射束环绕轨道78的位置。

[0337] 本实施例能够得到在实施例4中产生的各效果。并且,本实施例还能够得到在实施例6中由射束电流测定装置98A产生的各效果。

[0338] 实施例8

[0339] 以下,使用图44、图45和图46对作为本发明的另一优选实施例的实施例8的粒子束照射装置进行说明。

[0340] 粒子束照射装置1等在实施例1至实施例7中叙述的粒子束照射装置各加速器具有用铁芯14A和14B构成的真空容器27。然而,在本实施例的粒子束照射装置1G中,加速器4D具有铁芯14A和14B,并且具有配置于铁芯14A和14B之间的真空容器27A。真空容器27A由非

磁性材料(例如,不锈钢)制成。铁芯14A配置于真空容器27A的上方,铁芯14B配置于真空容器27A的下方。无质量切割板12以及射束电流测定装置98的射束电流测定部15被配置于真空容器27A内。形成射束环绕轨道78的中间面77与真空容器27以及环状线圈11A、11B的中心轴C垂直地形成在真空容器27A内。离子入射管3A贯穿铁芯14A包含的旁轭5A的底座部74A而到达真空容器27A内。在离子入射管3A的前端形成的离子注入口在真空容器27A内开口。在离子入射管3A的中心轴的延长线上配置的吸引管26贯穿旁轭5B的底座部74B被安装在底座部74B上。该吸引管26与真空容器27A连接,在真空容器27A内开口。入射用电极18被安装在离子注入管3A的前端。

[0341] 此外,包含铁芯14A以及14B的粒子束照射装置1G的其他结构与粒子束照射装置1相同。

[0342] 安装在无质量切割板12的操作部件16以及安装在射束电流测定部15的操作部件16A贯穿真空容器27A以及旁轭5B的筒状部75B而到达旁轭5B的外部。在旁轭5B的外部,操作部件16和16A与移动装置17和17A连接。切割电磁铁19被安装在真空容器27A和筒状部75B。在切割电磁铁19形成的射束出射路径20被连接至射束输送系统13的射束路径48。射束出射路径20的入口位于真空容器27A内。

[0343] 在真空容器27A内的中间面77,形成上述的轨道同心区域以及包围该轨道同心区域的轨道偏心区域。轨道同心区域以及该轨道同心区域包围入射用电极18。在轨道同心区域形成的各射束环绕轨道78与实施例同样地,集中在射束出射路径20的入口侧。在本实施例中,入射用电极18以及离子注入口的位置从环状线圈的中心轴C,即从位于该中心轴C上的环状线圈的重心向射束出射路径20的入口偏移,在加速器4D的半径方向上位于与环状线圈的重心不同的位置上。在铁芯14A以及14B形成的各磁极7A~7F与实施例1同样地,将离子注入口的位置周围包围起来进行配置,从离子注入口的位置放射状地延伸。在铁芯14A以及14B形成的各凹部29A~29F也与实施例1同样地,将离子注入口的位置周围包围起来进行配置,从离子注入口的位置放射状地延伸。

[0344] 在本实施例中也与实施例1同样地,在中间面77形成图10所示的磁场分布,执行步骤S1~S6、S23、S24、S7~S14、S7以及S15~S21的各工序来对患者56的患部照射离子束。

[0345] 本实施例能够得到在实施例1中产生的各效果。在本实施例中,另外设置真空容器27A,因此不需要像实施例1那样将彼此相对的旁轭5A的筒状部75A和旁轭5B的筒状部75B的相对面进行密封。然而,在本实施例中,将真空容器27A配置在铁芯14A和铁芯14B之间,因此在本实施例中使用的加速器4D比在实施例1中使用的加速器4大。

[0346] 如图47所示,也可以将无质量切割板12配置在真空容器27A的外部,将该真空容器27A配置在无质量切割板12的各磁极32A和与其相对的各磁极32B之间。在该情况下,射束电流测定部15被配置在真空容器27A内的中间面77。通过这样配置在无质量切割板12,也能够使在真空容器27A内的中间面77上形成的射束环绕轨道78中环绕的离子束射出,能够使该离子束经过射束出射路径20出射到射束输送系统13。

[0347] 实施例9

[0348] 以下,使用图48对作为本发明的另一优选实施例的实施例9的粒子束照射装置进行说明。

[0349] 本实施例的粒子束照射装置1F与粒子束照射装置1E同样地,在铁芯14A和铁芯14B之间配置真空容器27A。粒子束照射装置1F具备加速器4E,该加速器4E具有铁芯14A和14B、真空容器27A以及配置在真空容器27A内的射束电流测定部15和能量吸收体62。安装在射束电流测定部15的操作部件16A以及安装在能量吸收体62的操作部件62贯穿真空容器27A以及旁轭5B的筒状部75B而到达旁轭5B的外部。

[0350] 在本实施例中,与实施例4同样地,在中间面77形成图10所示的磁场分布,实施实施例1中叙述的步骤S1~S6、S23、S24以及S7~S10的各工序中的除步骤S8和S9的各工序以外的各工序。并且,实施图32所示的步骤S11、S12、S22、S7以及S15~S21的各工序。在本实施例中,从真空容器27A出射到射束输送系统13的离子束被照射至治疗台55上的患者56的患部。

[0351] 本实施例能够得到在实施例4中产生的各效果。然而,在本实施例中,将真空容器27A配置于铁芯14A和铁芯14B之间,因此在本实施例中使用的加速器4D比在实施例4中使用的加速器4B大。

[0352] 在本发明中,也可以代替产生质子的离子源3使用产生碳离子(C^{4+})的离子源,将该碳离子(C^{4+})用电荷变换器进行电荷变换而变换为碳离子(C^{6+})在加速器内生成碳离子束(C^{6+} 的离子束),使生成的碳离子束从加速器出射经过射束输送系统导入到照射装置7中。在该情况下,向治疗台55上的患者56的患部照射碳离子束来代替质子离子束。并且,作为离子源3也可以使用产生氦离子的离子源,从加速器向射束输送系统出射氦离子束。

[0353] 另外,在本申请中,在与环状线圈11A、11B的中心轴C垂直的平面内不存在的要素间的位置关系意味着将这些要素在中心轴C方向上投影到中间面77,该中间面77中的这些要素之间的位置关系。这样的要素间的位置关系例如相当于在实施例8和9中记载的在离子入射管3A的前端形成的离子注入口(离子入射口)或入射用电极18或离子入射部与磁极7A~7F、高频加速电极9A~9D、射束出射路径20以及凹部29A~29F的位置关系、磁极7A~7F、高频加速电极9A~9D、射束出射路径20以及凹部29A~29F相互间的位置关系、离子注入口和射束出射路径20的入口的位置关系等。

[0354] 符号说明

[0355] 1、1A、1B、1C、1D、1E、1F粒子束照射装置;2、2A、2B离子束产生装置;3离子源;3A离子入射管;4、4A、4B、4C、4D、4E加速器;6旋转台架;7照射装置;7A~7F、32A、32B磁极;8A~8F调整线圈;9A~9D高频加速电极;11A、11B环状线圈;12无质量切割板;13、13B射束输送系统;14A、14B铁芯;15射束电流测定部;17、17A、60移动装置;18入射用电极;19切割电磁铁;20、48射束路径;24A~24P弯曲点;27、27A真空容器;29A~29F凹部;30、30A、30B...铁芯部件;31A、31B...铁芯部;31C连接部;33A、33B线圈;35射束通道;36高频电源;37、40、57、80、82电源;51、52扫描电磁铁;53射束位置监视器;54剂量监视器;62能量吸收体;65控制系统;66中央控制装置;69、69A、69B加速器/输送系统控制装置;70扫描控制装置;76射束环绕区域;77中间面;83入射用电极控制装置;84射束电流测定部控制装置;85电磁铁控制装置;86无质量切割板控制装置;88旋转控制装置;89照射位置控制装置;91剂量判定装置;92层判定装置;93能量吸收体控制装置;94线圈电流控制装置;98、98A射束电流测定装置;99高频电压控制装置;101电动机壳体;103电动机电极。

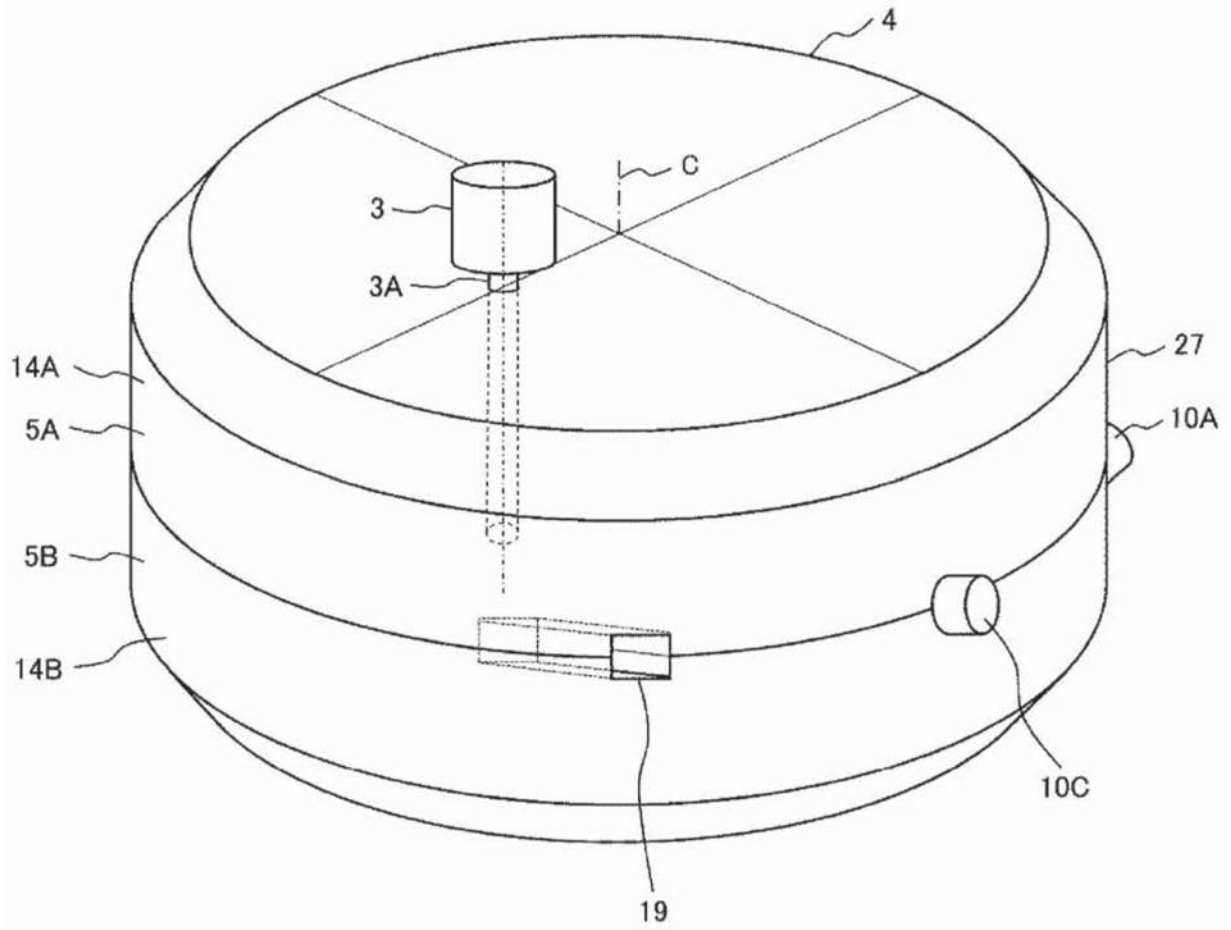


图2

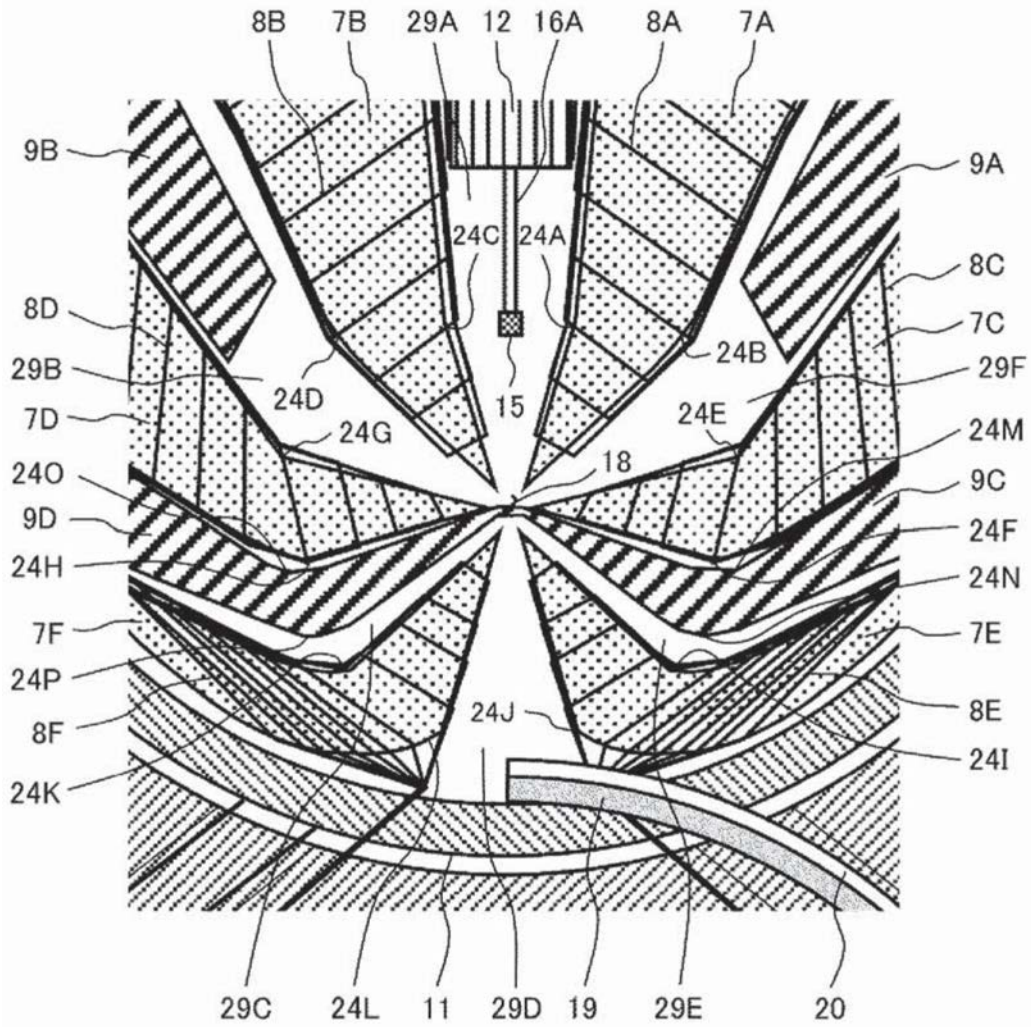


图4

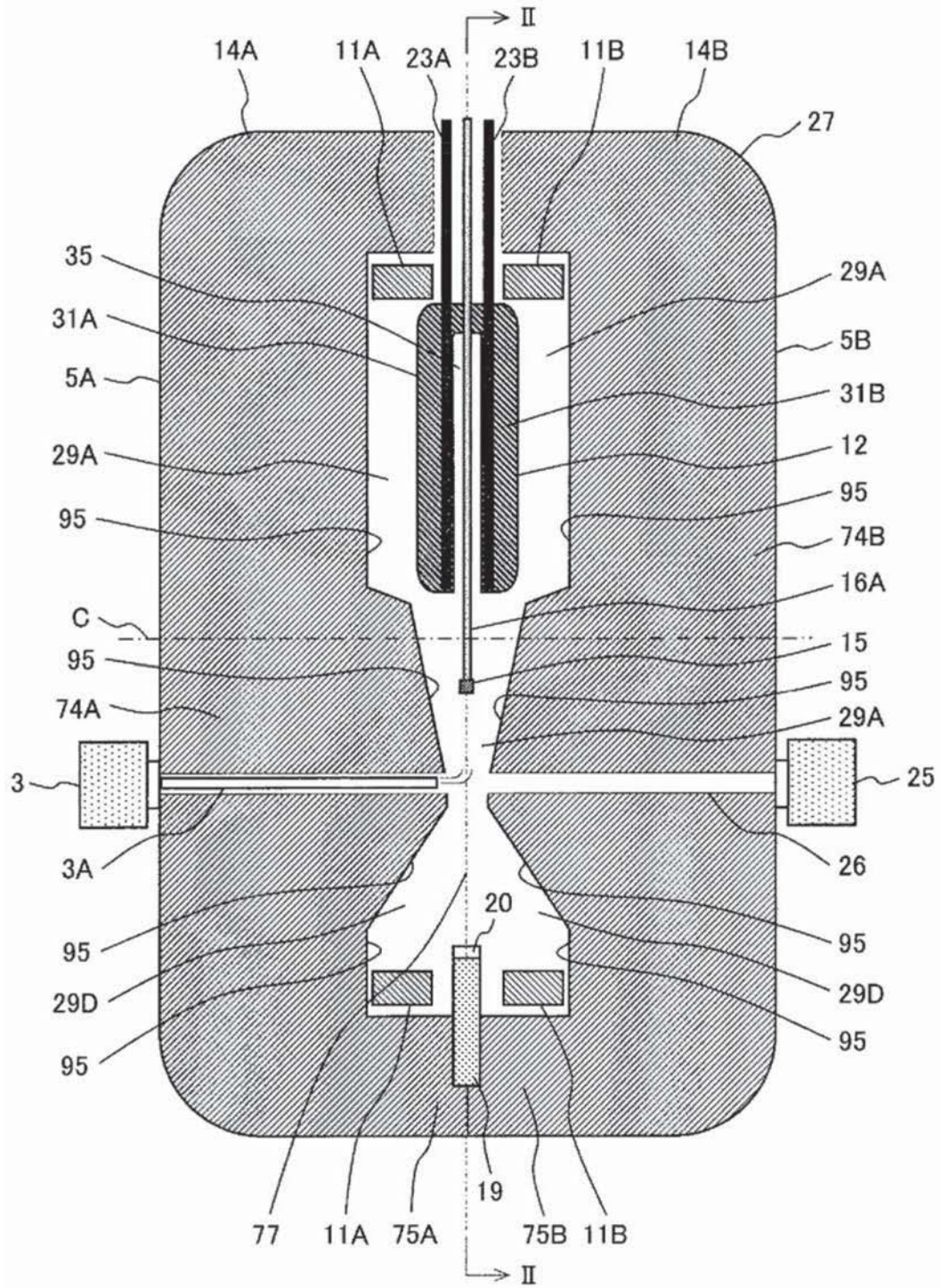
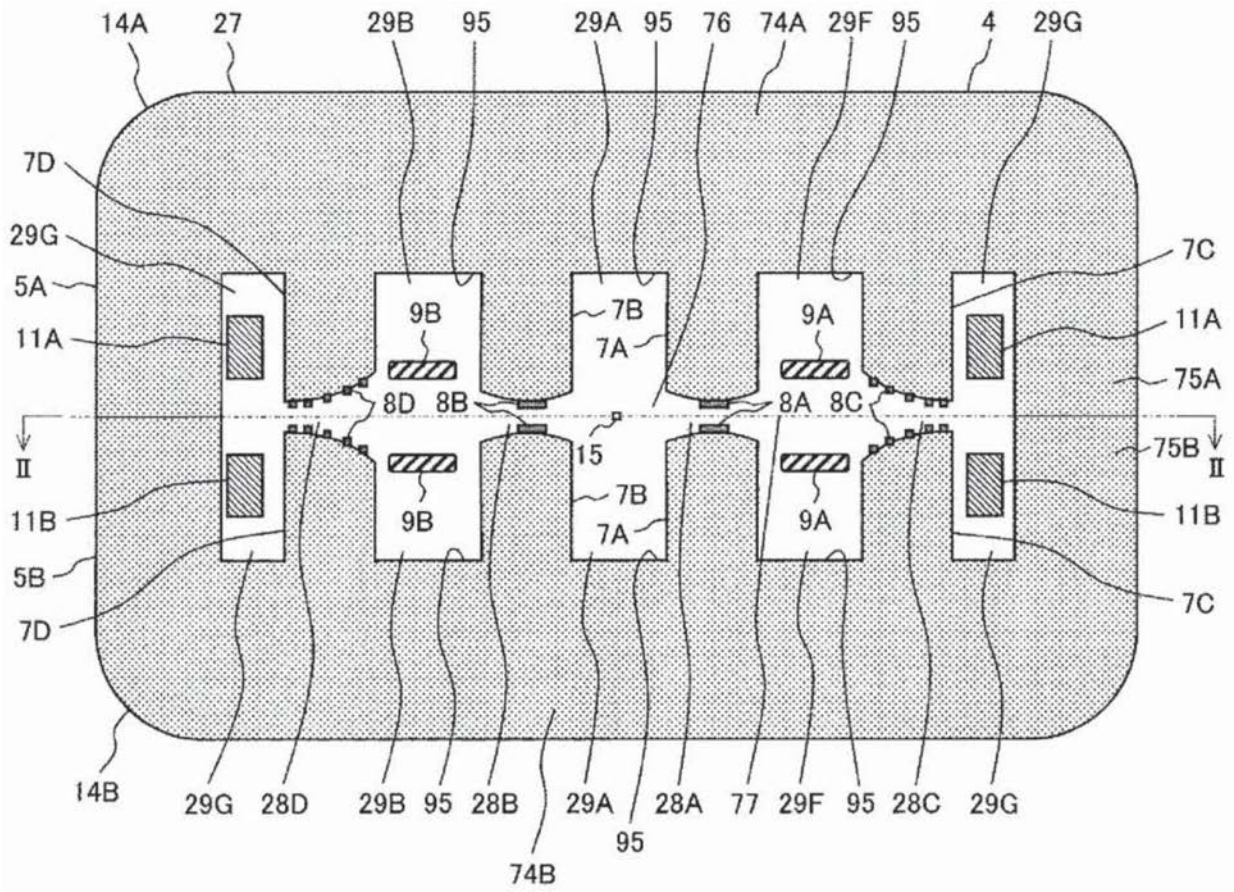


图5



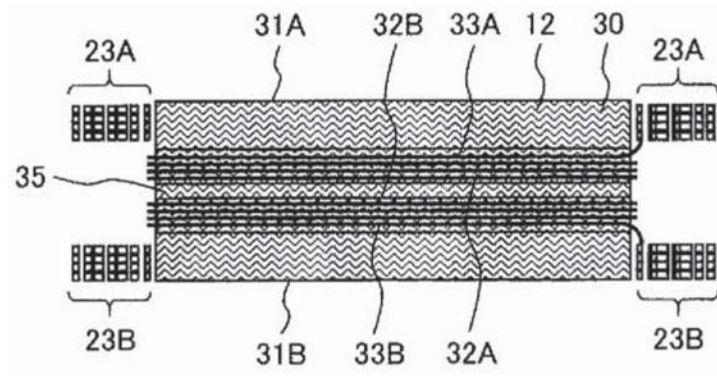


图8

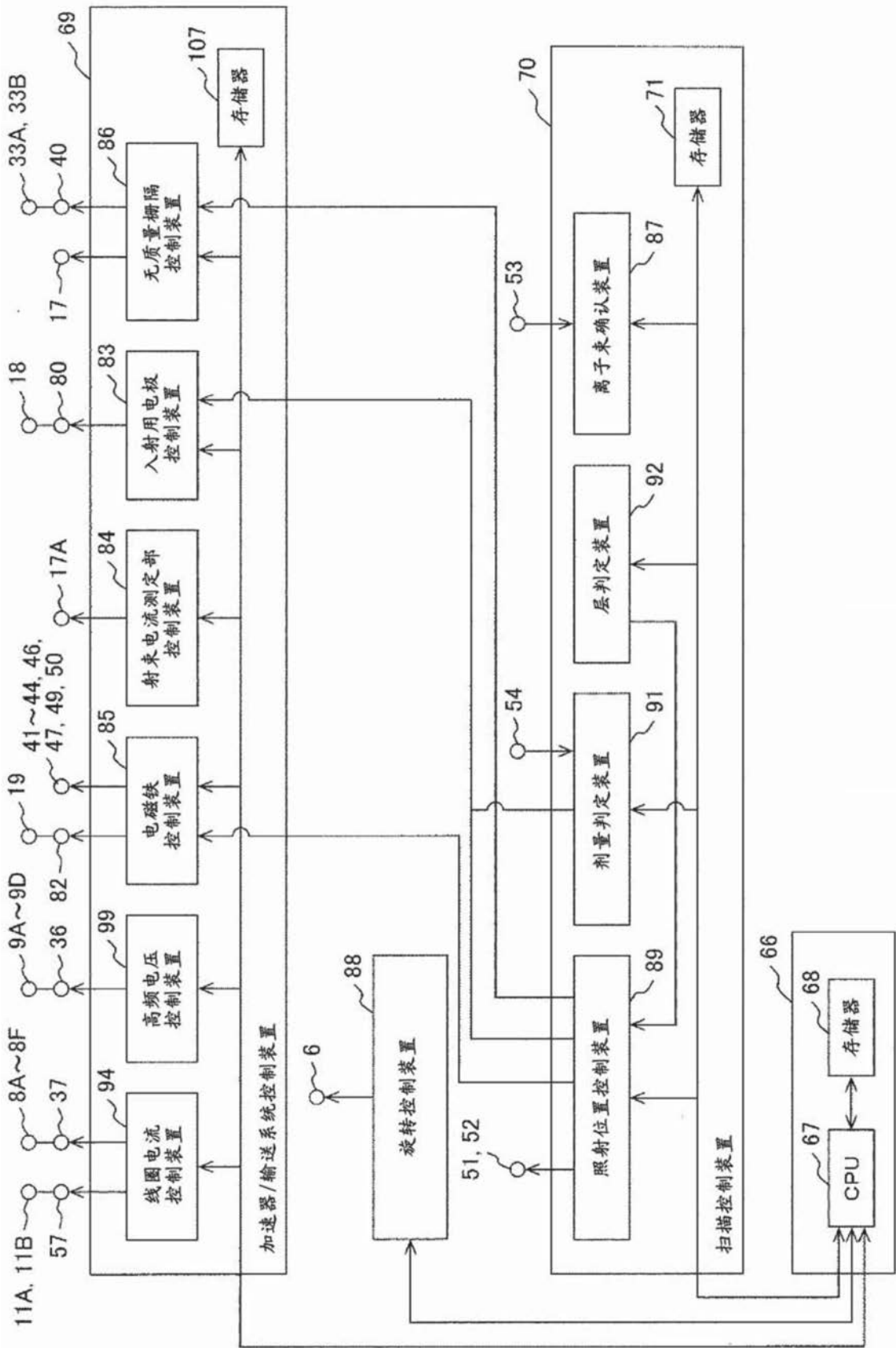


图9

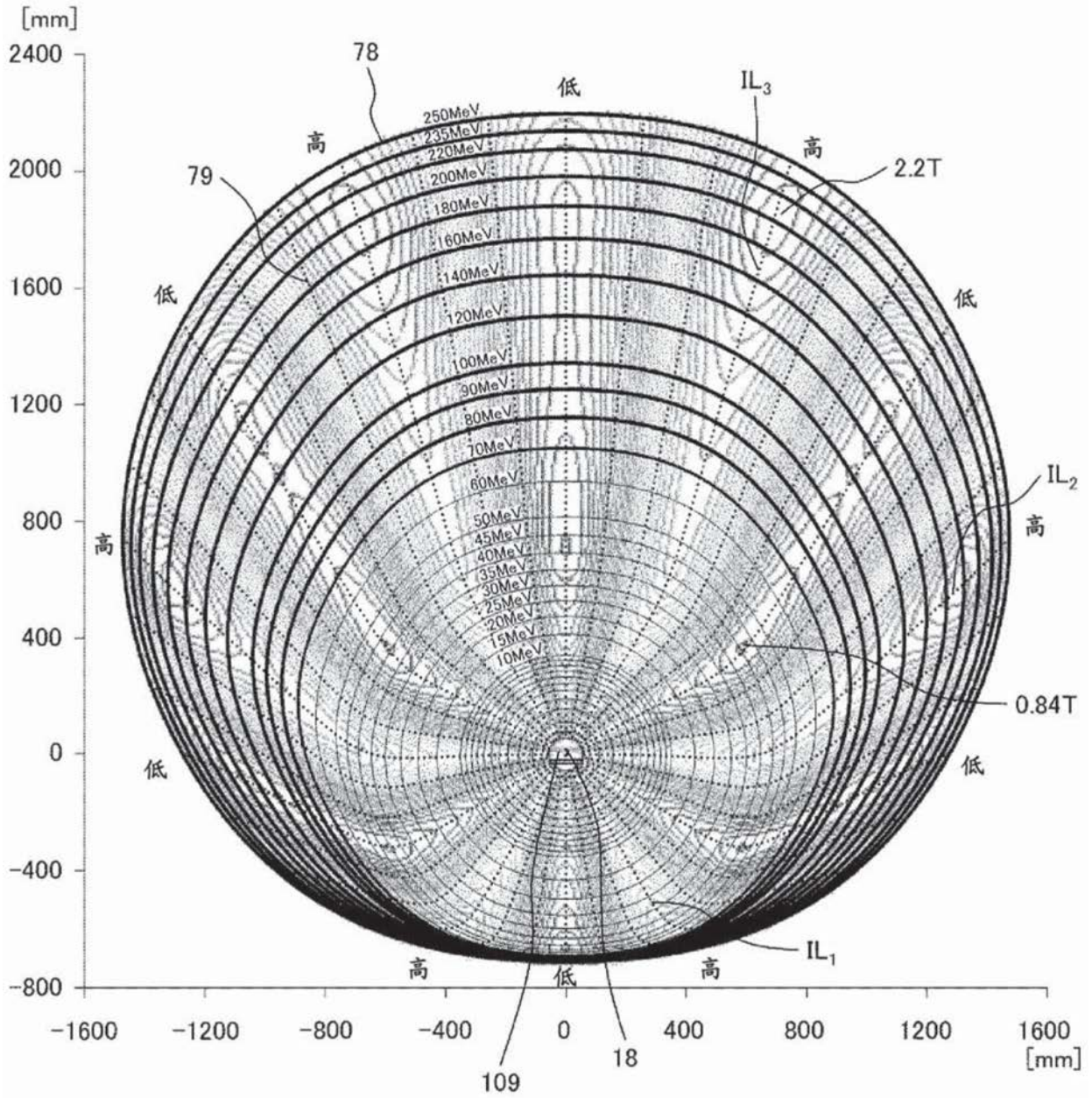


图10

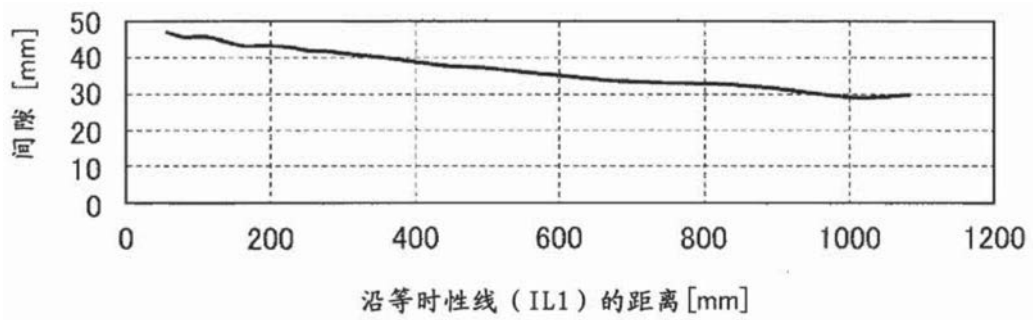


图11

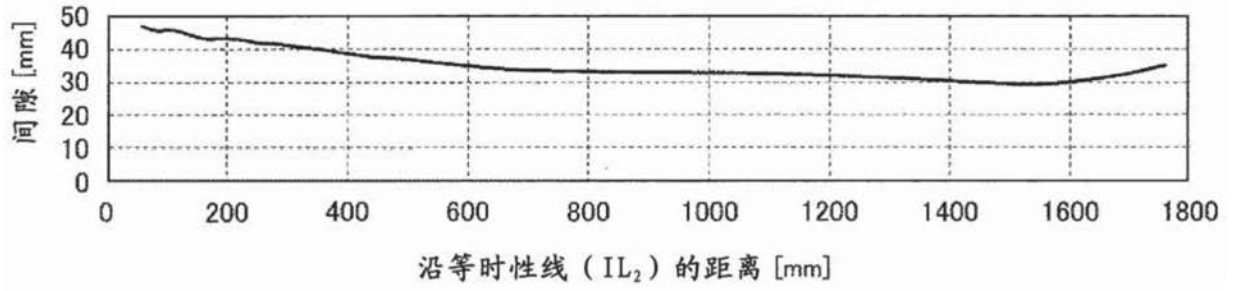


图12

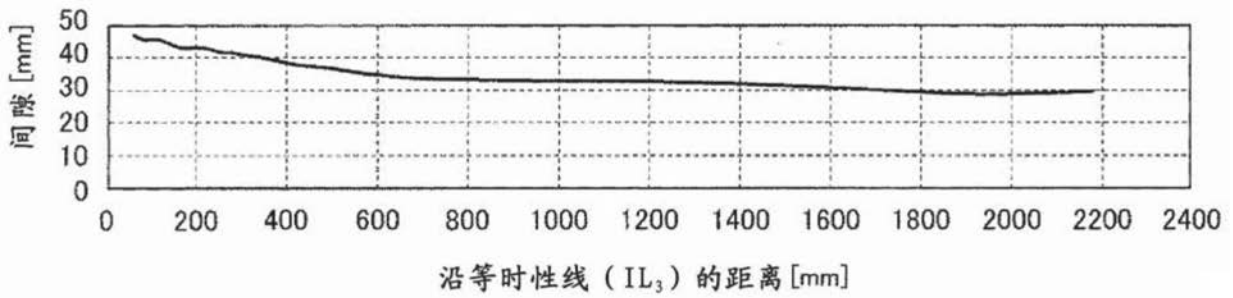


图13

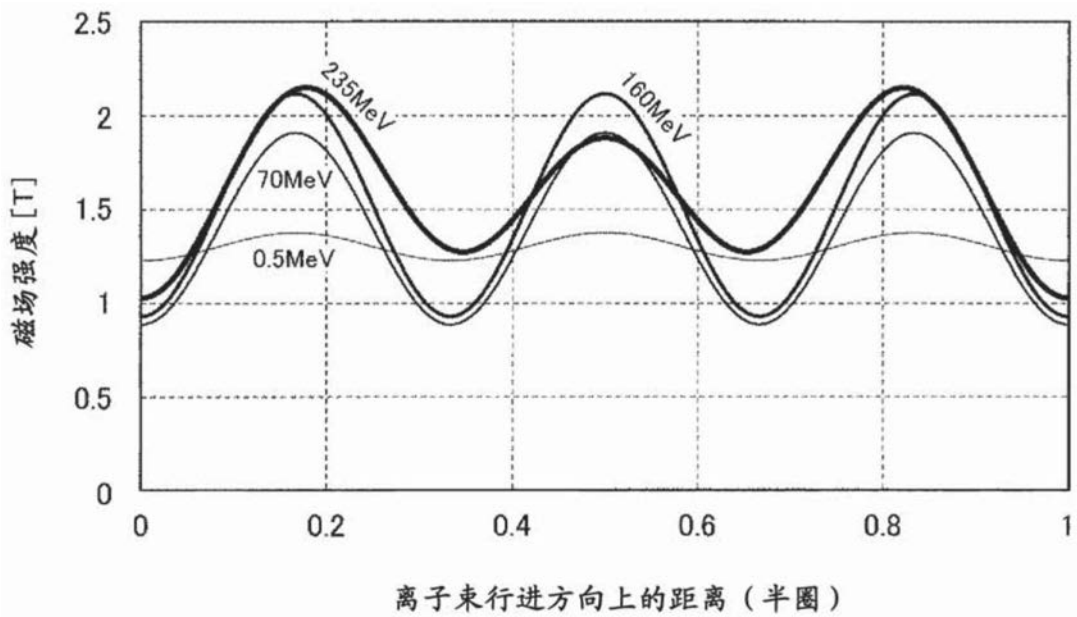


图14

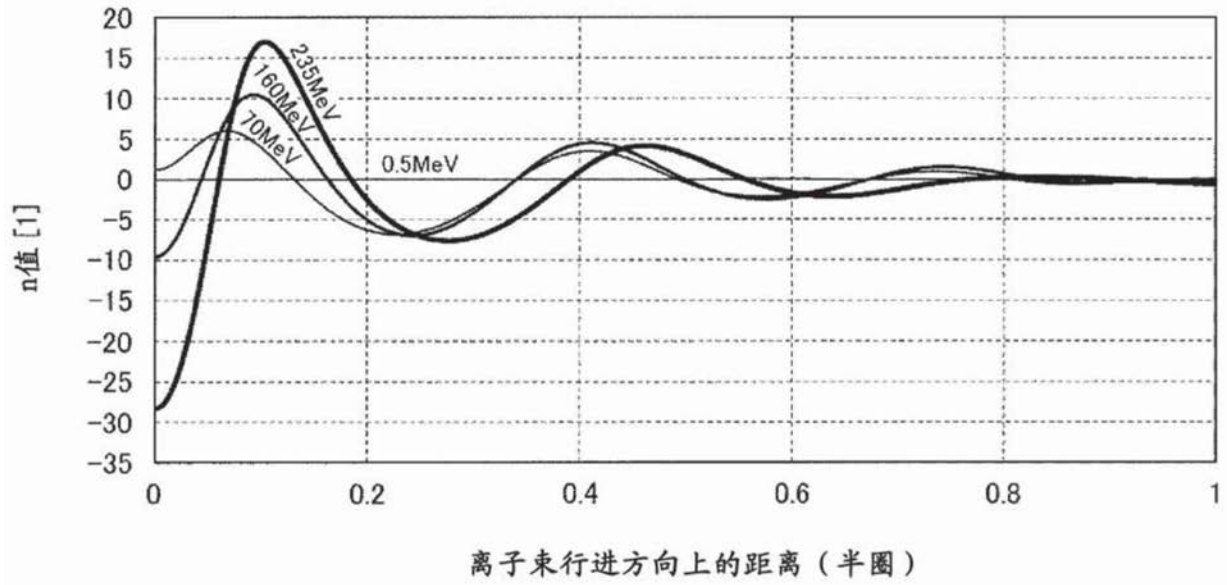


图15

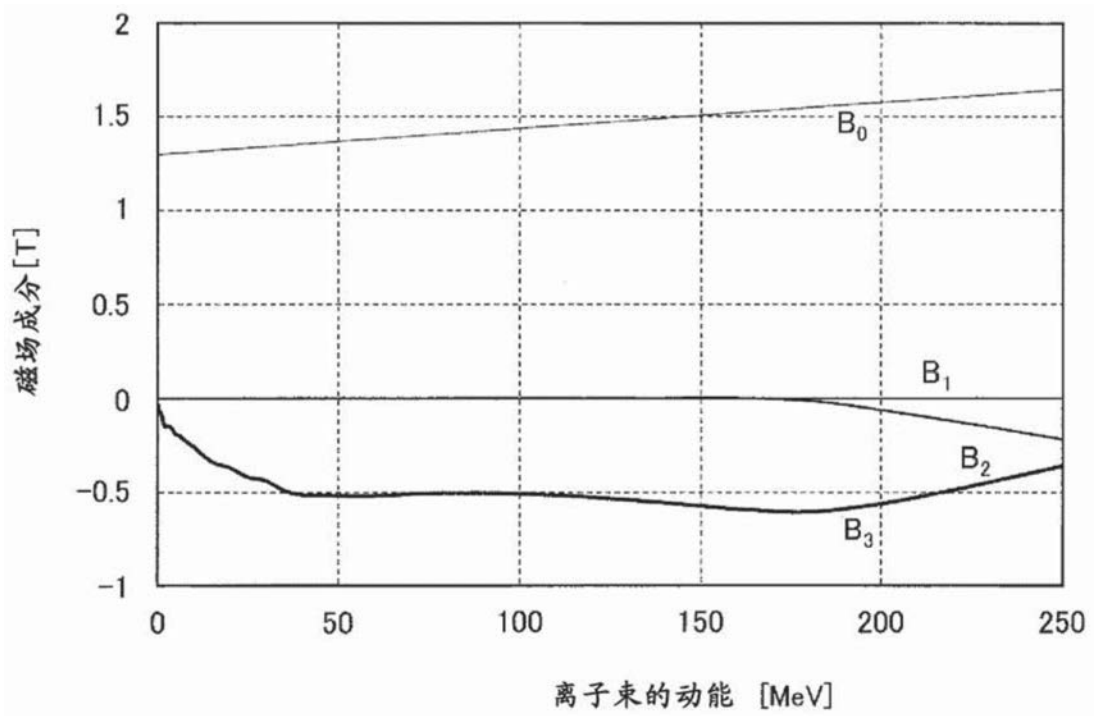


图16

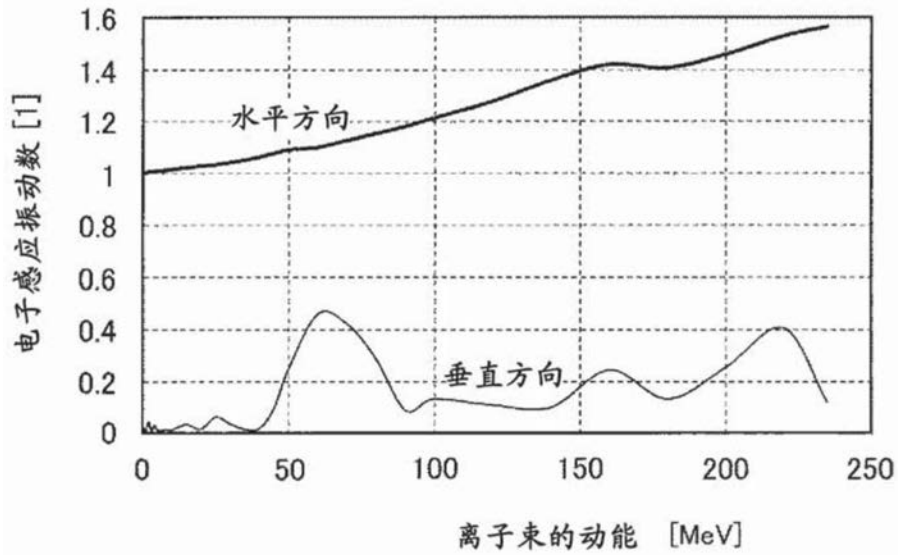


图17

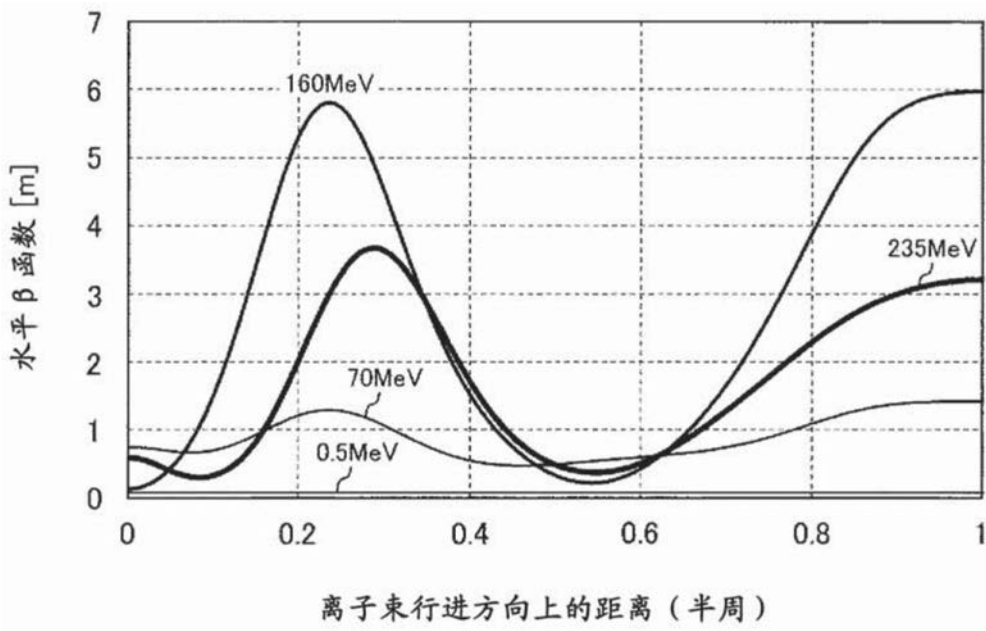


图18

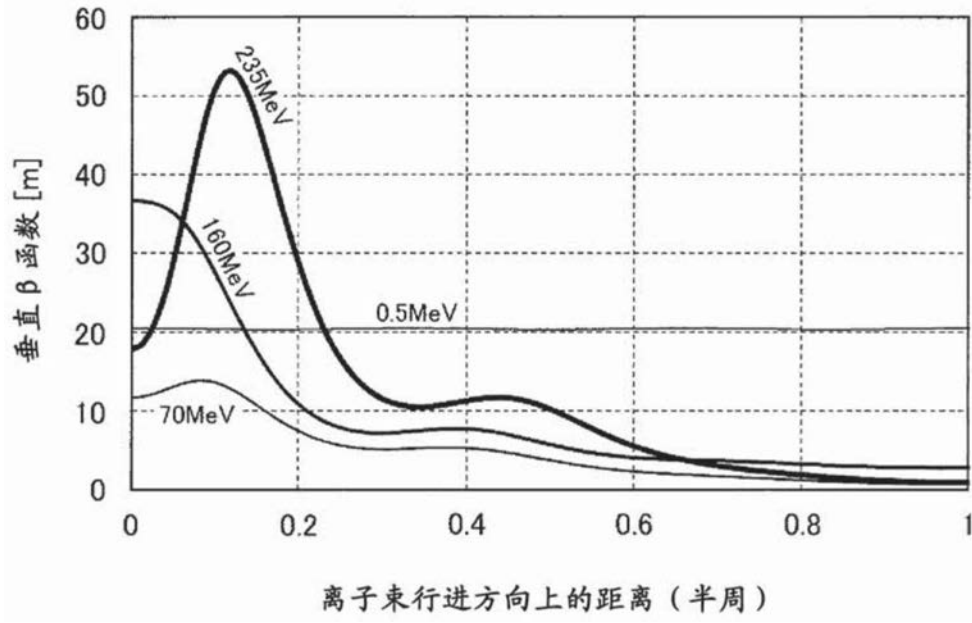


图19

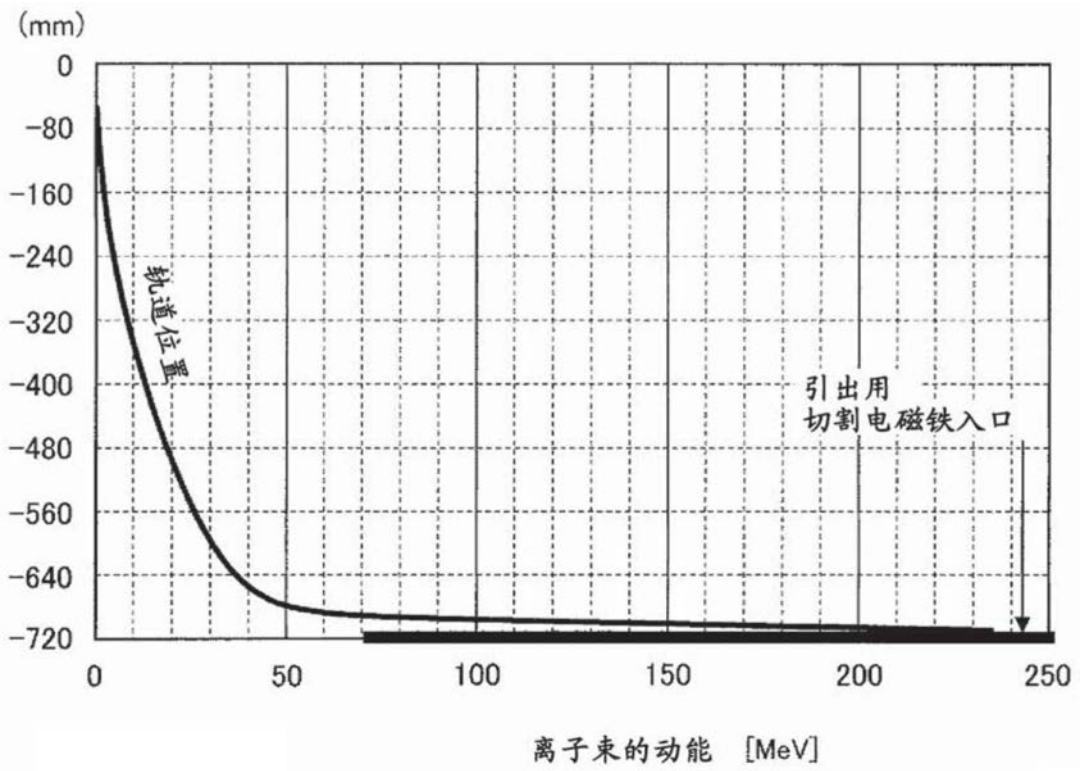


图20

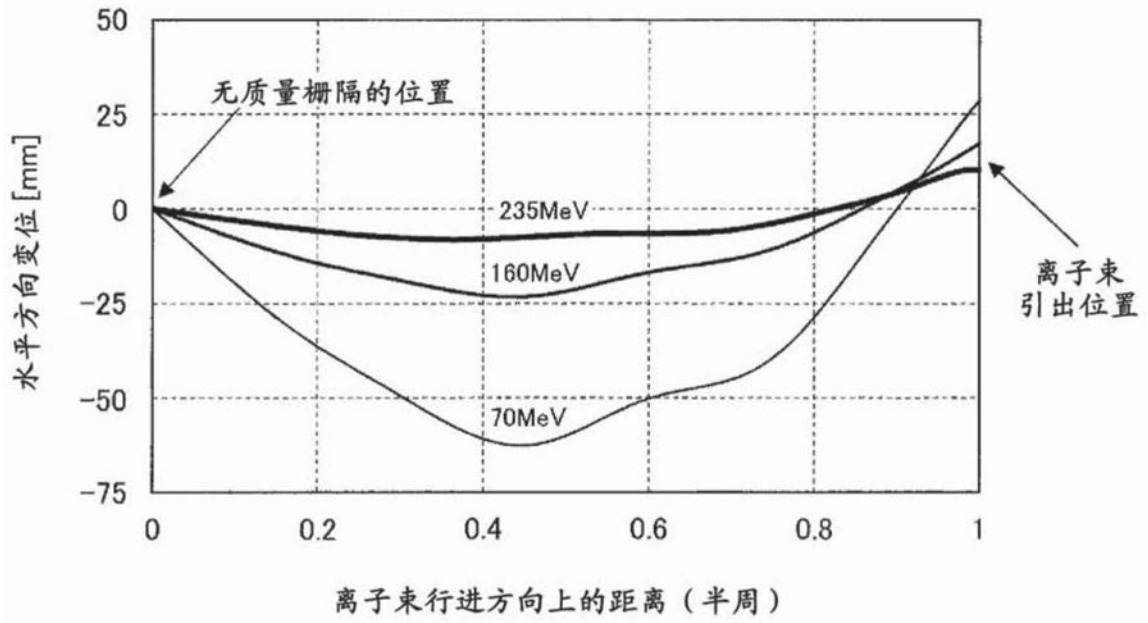


图21

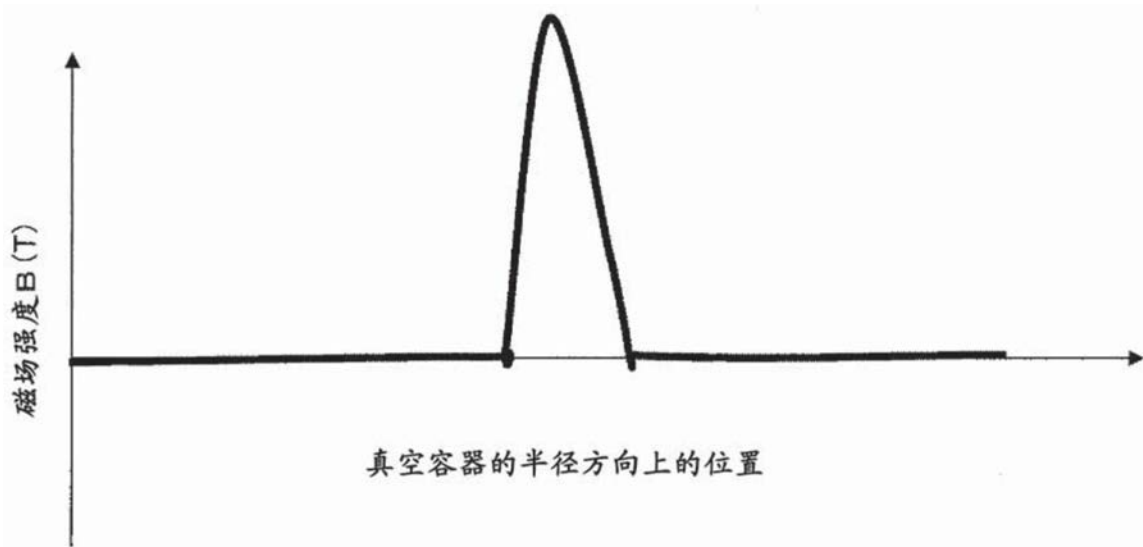


图22

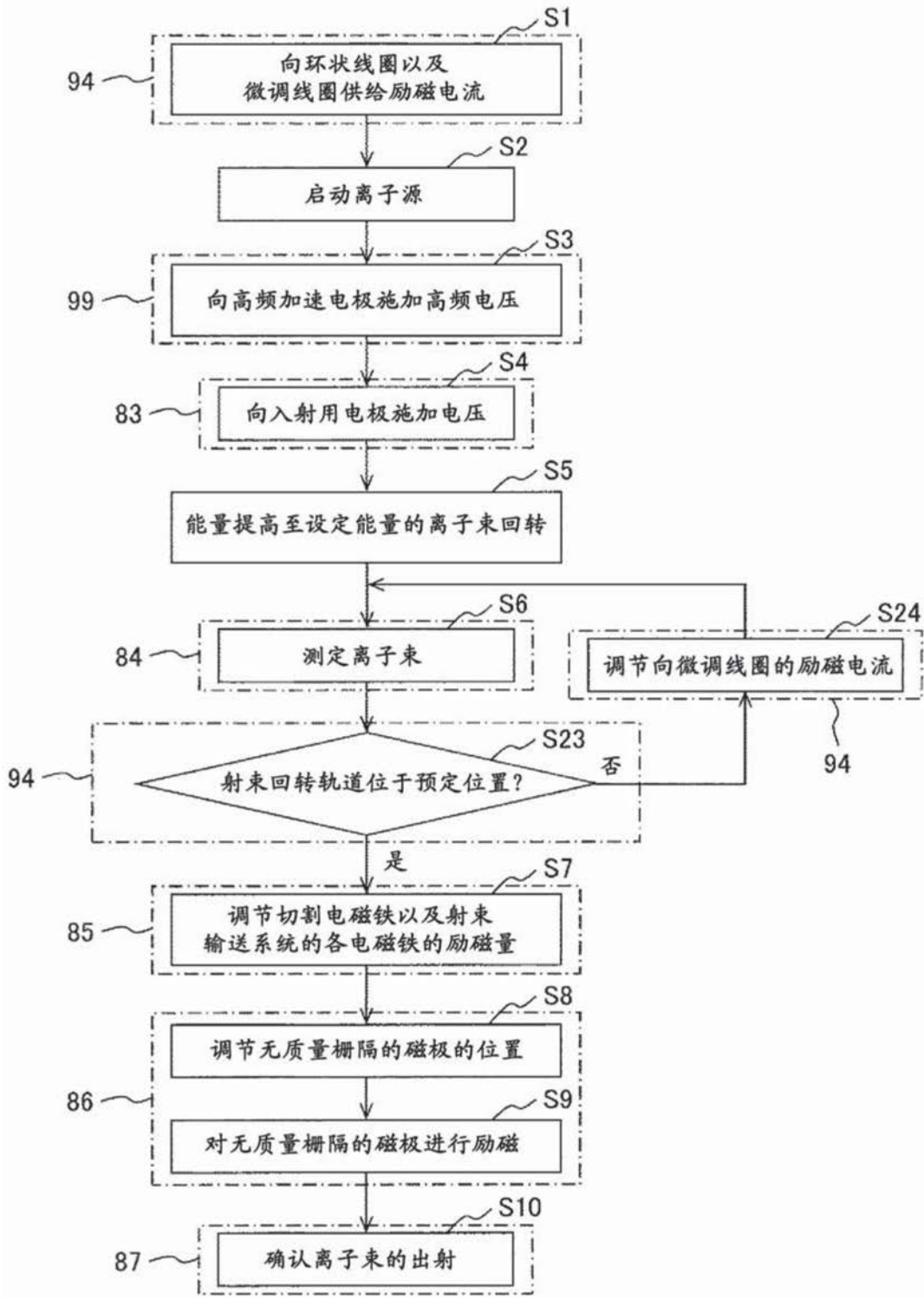


图23

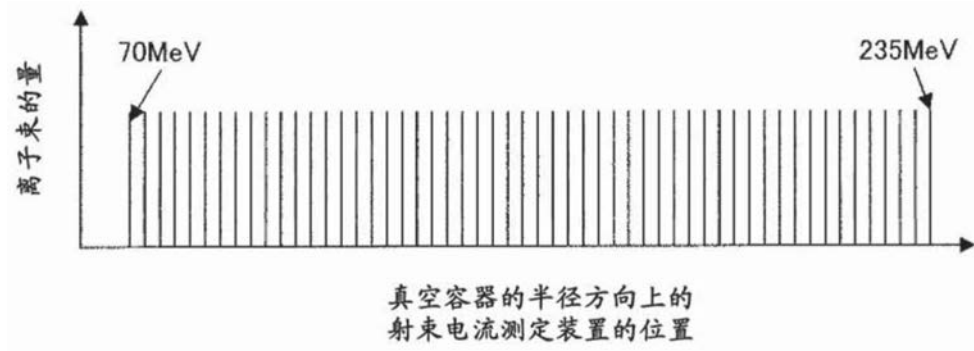


图24

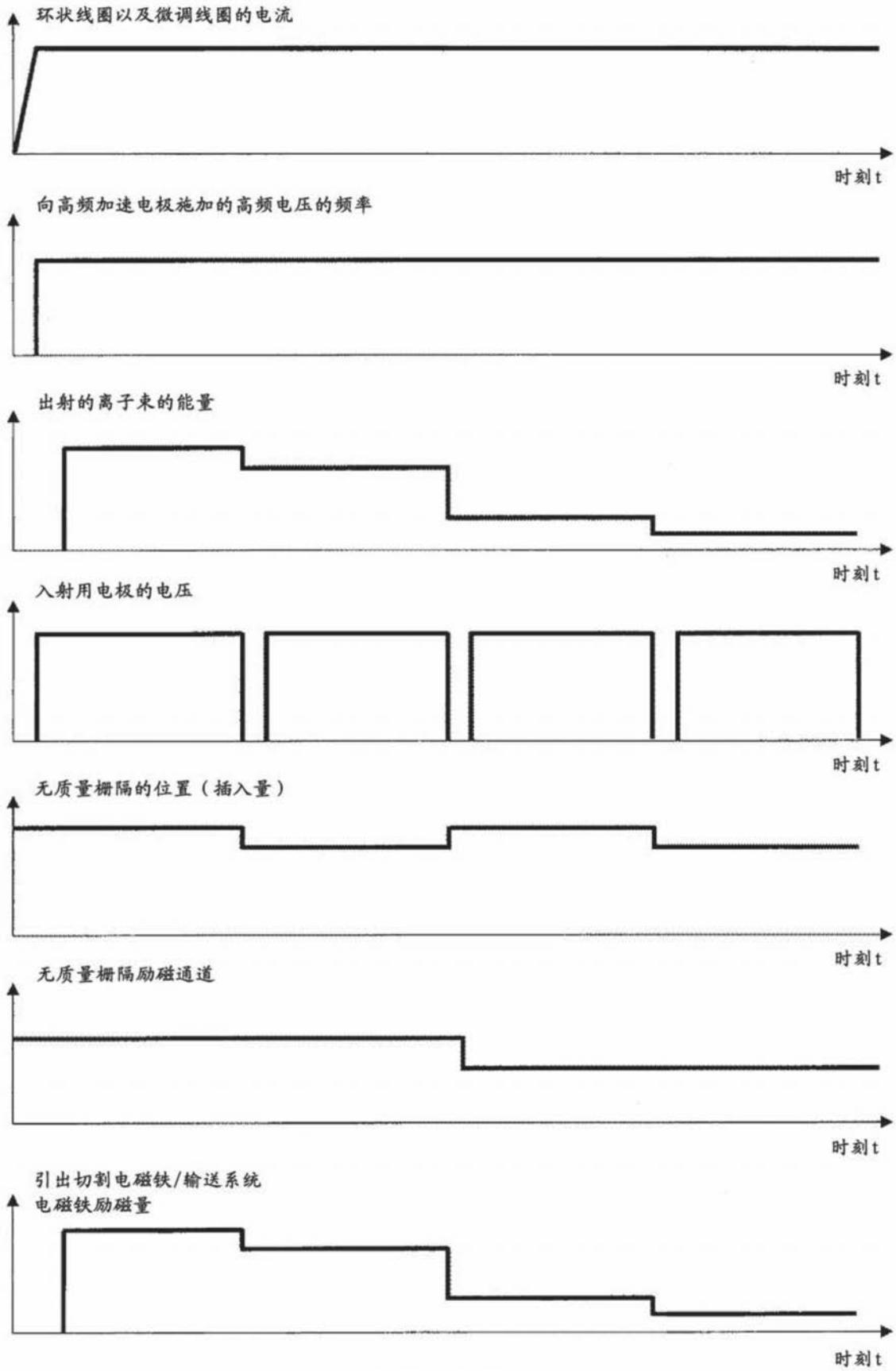


图25

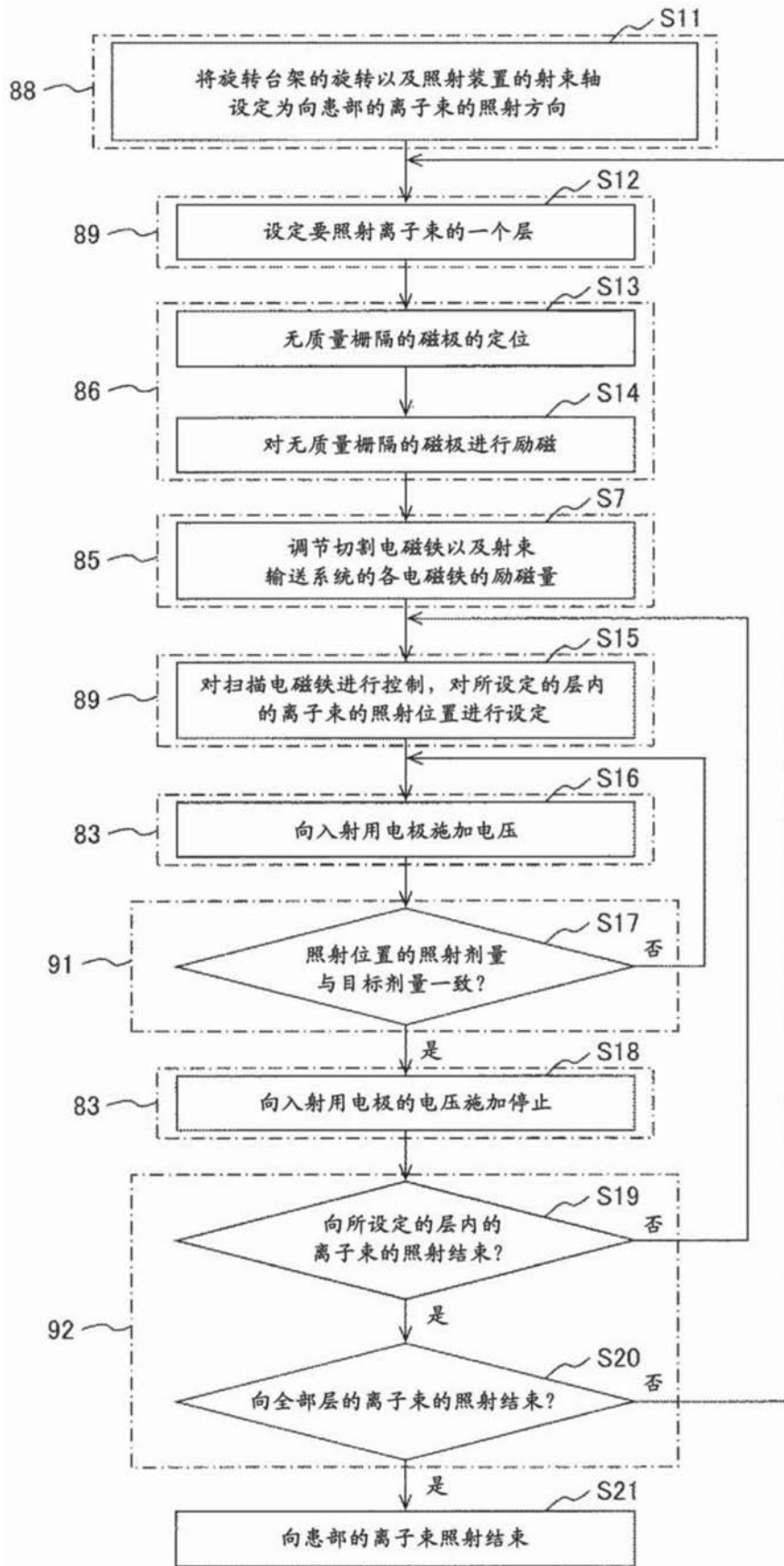


图26

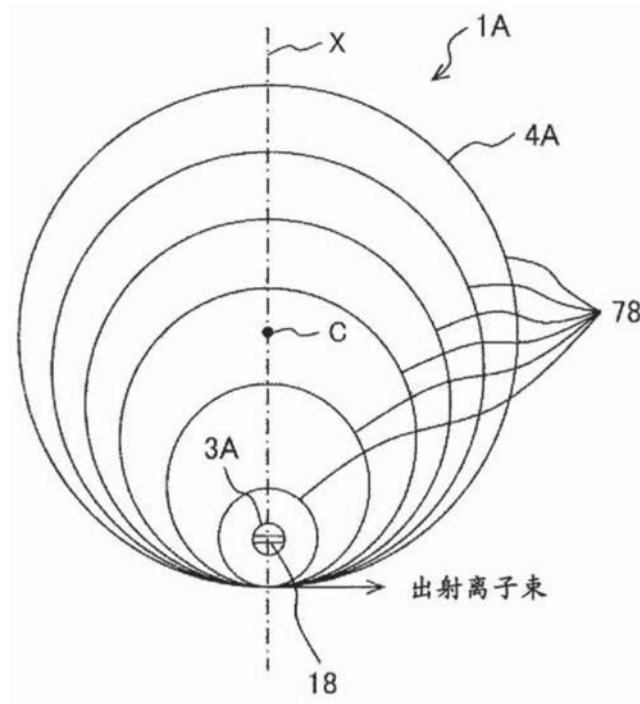


图27

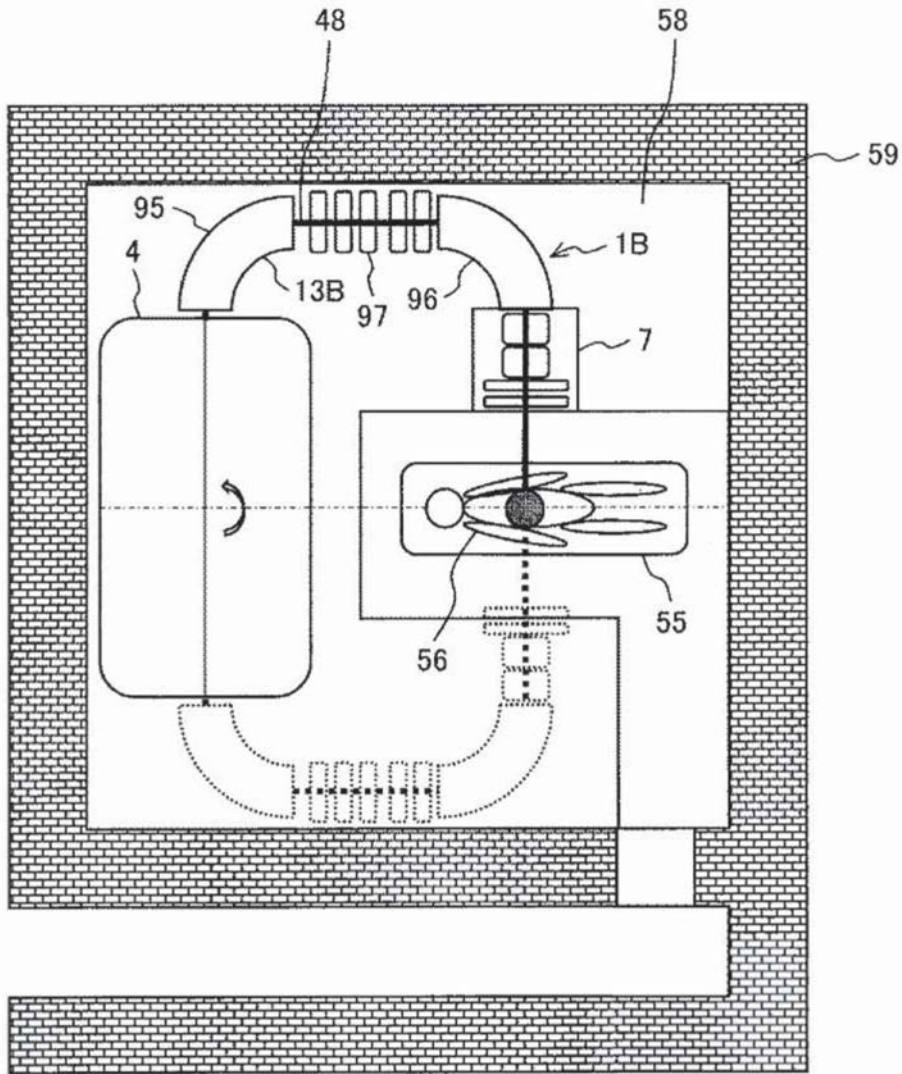


图28

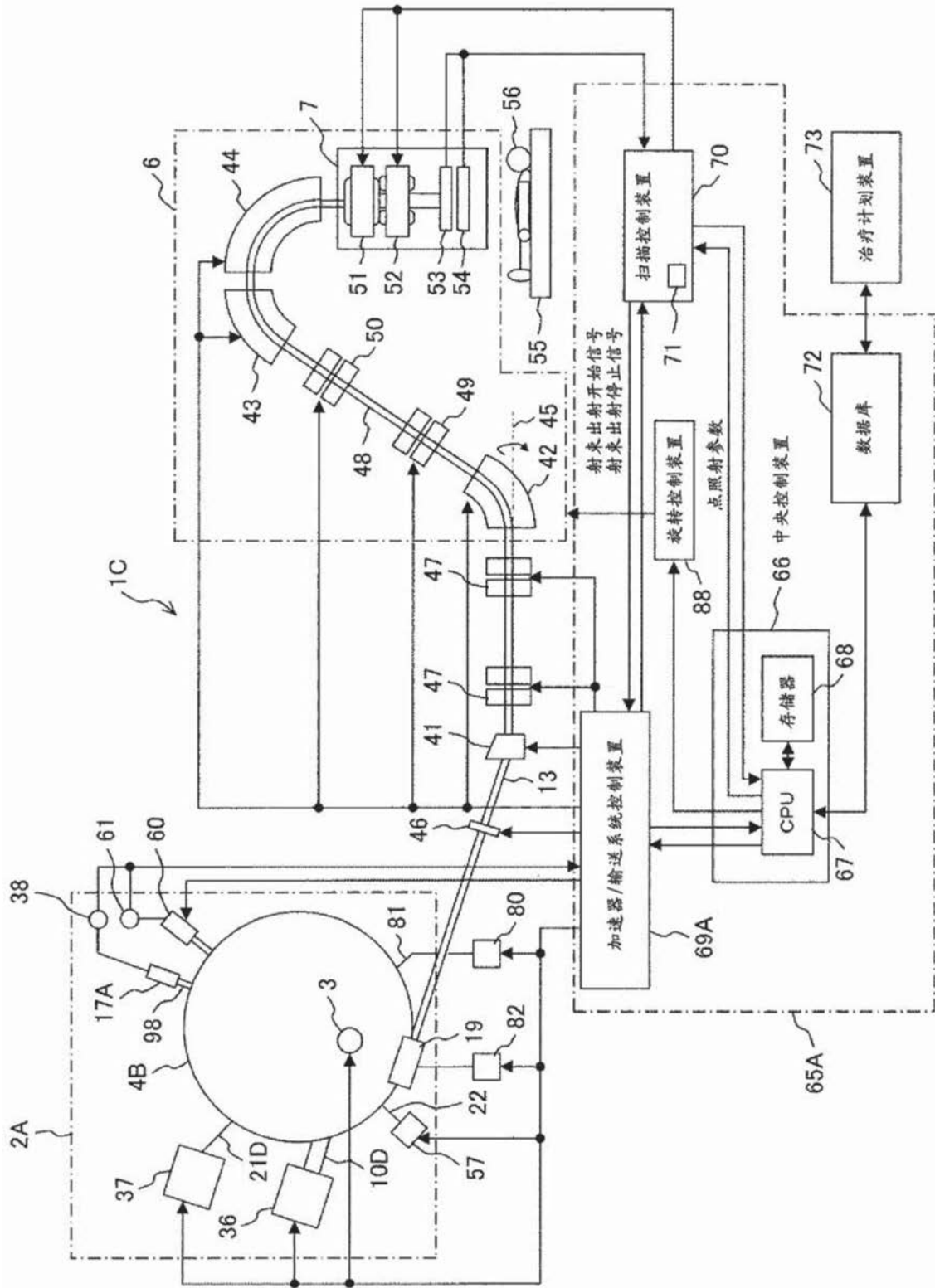


图29

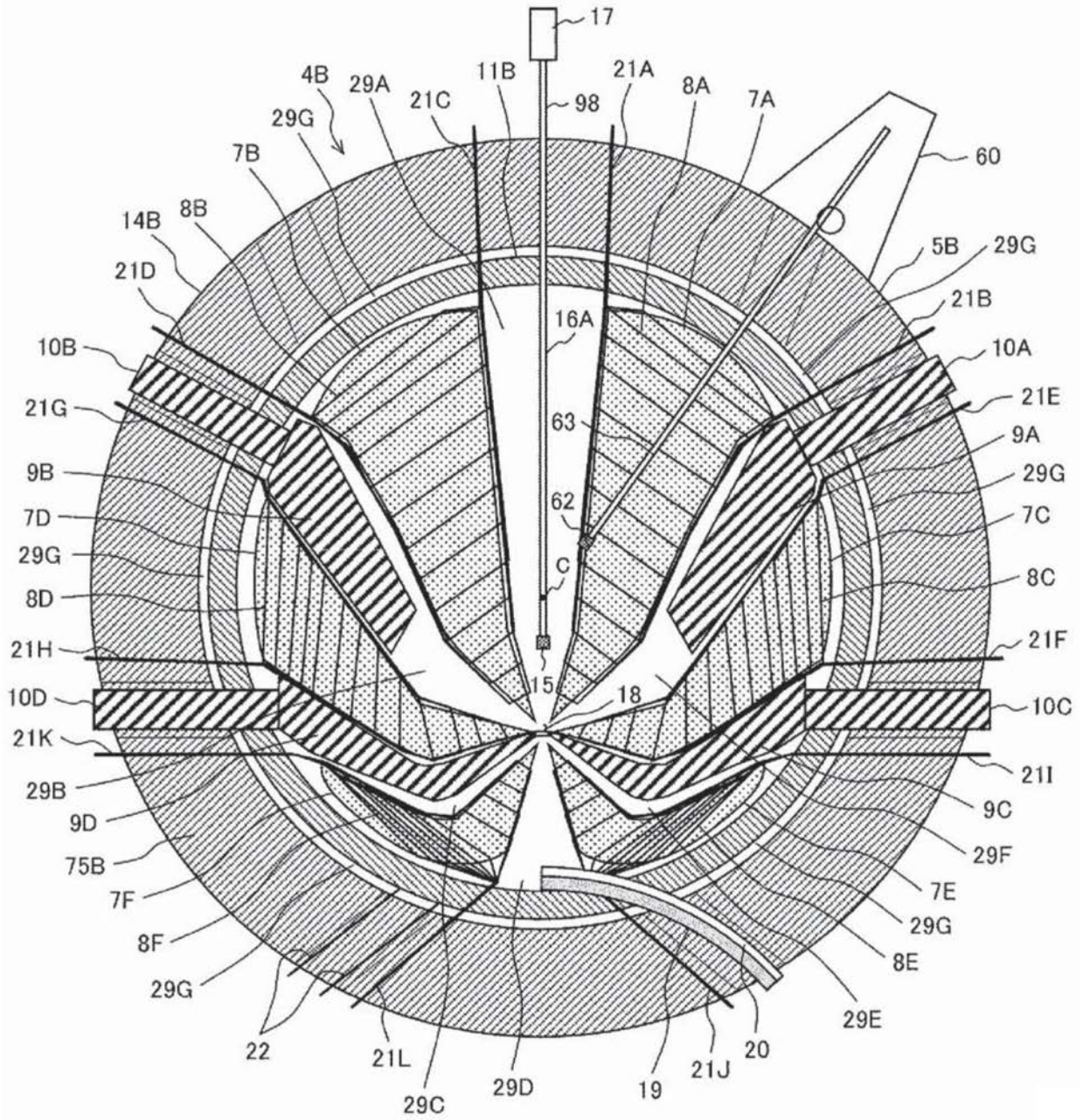


图30

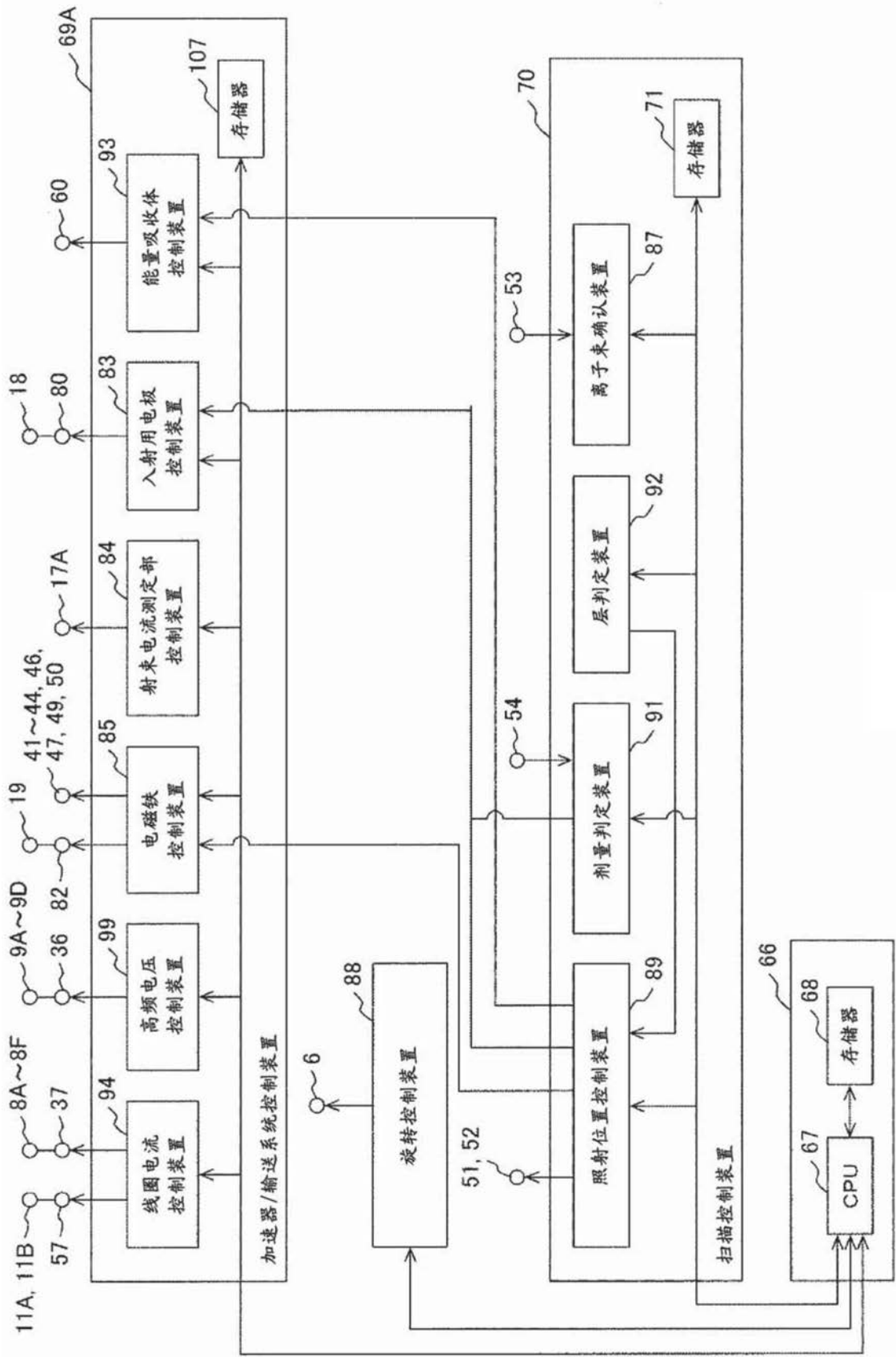


图31

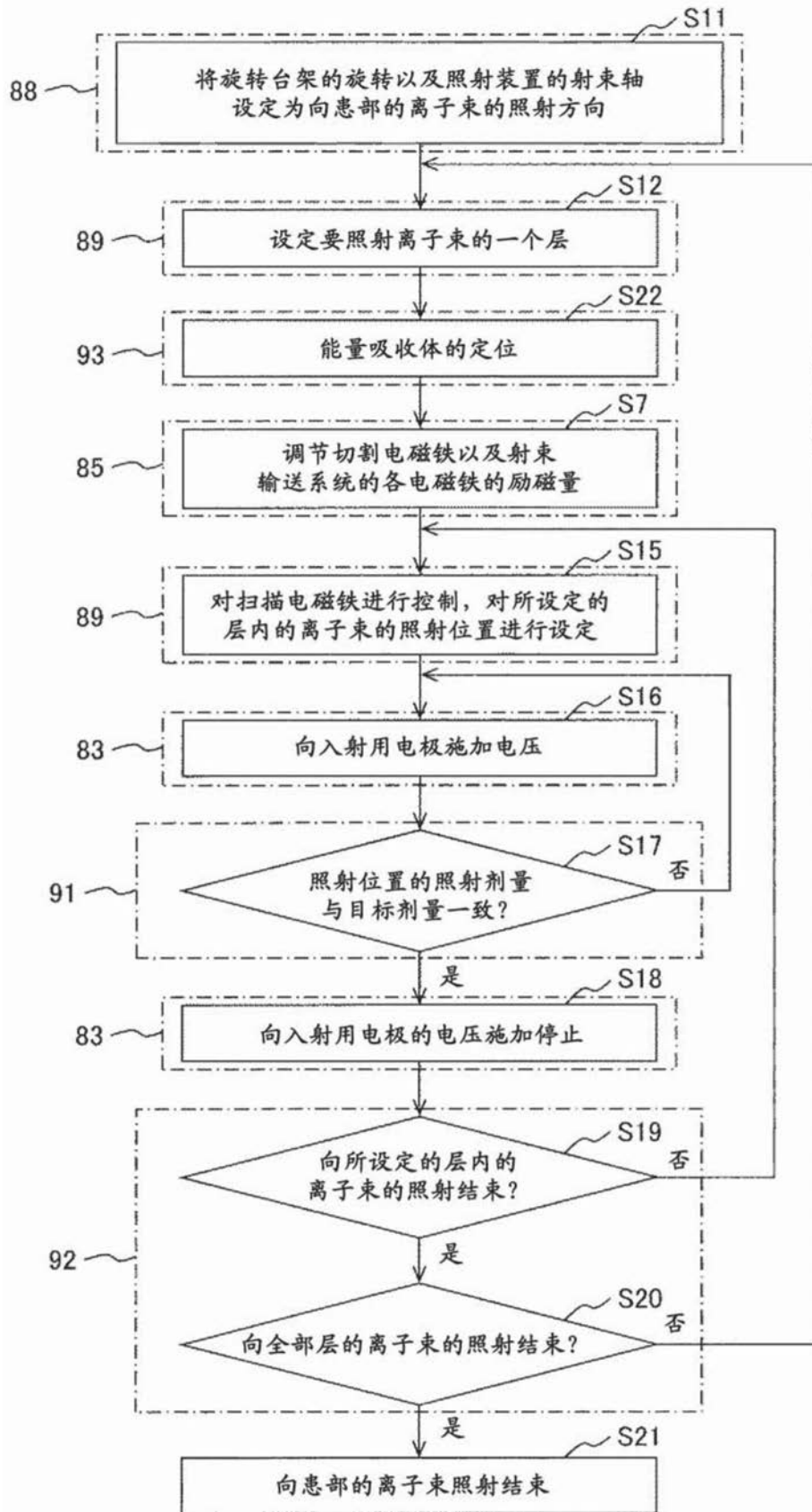


图32

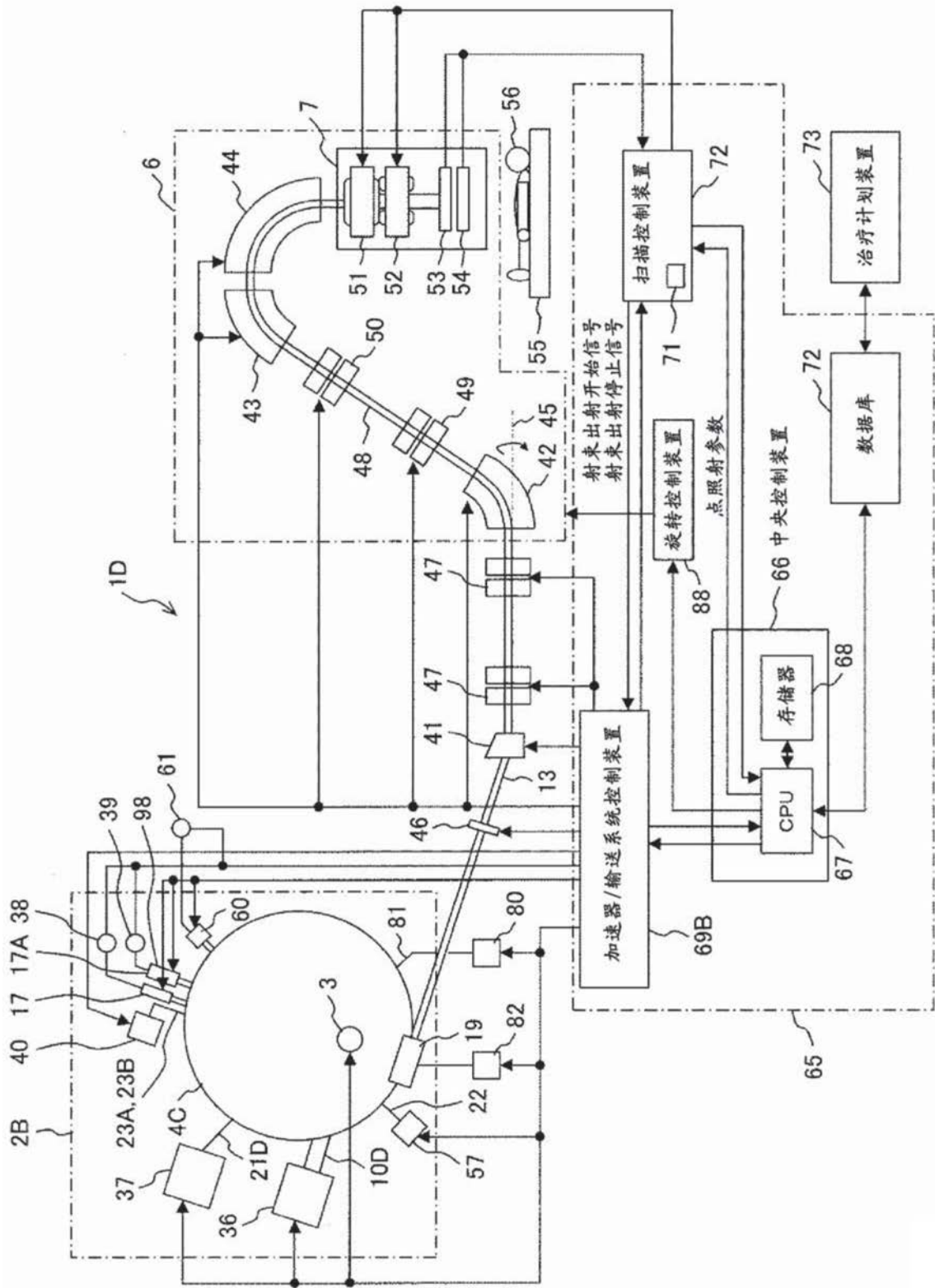


图33

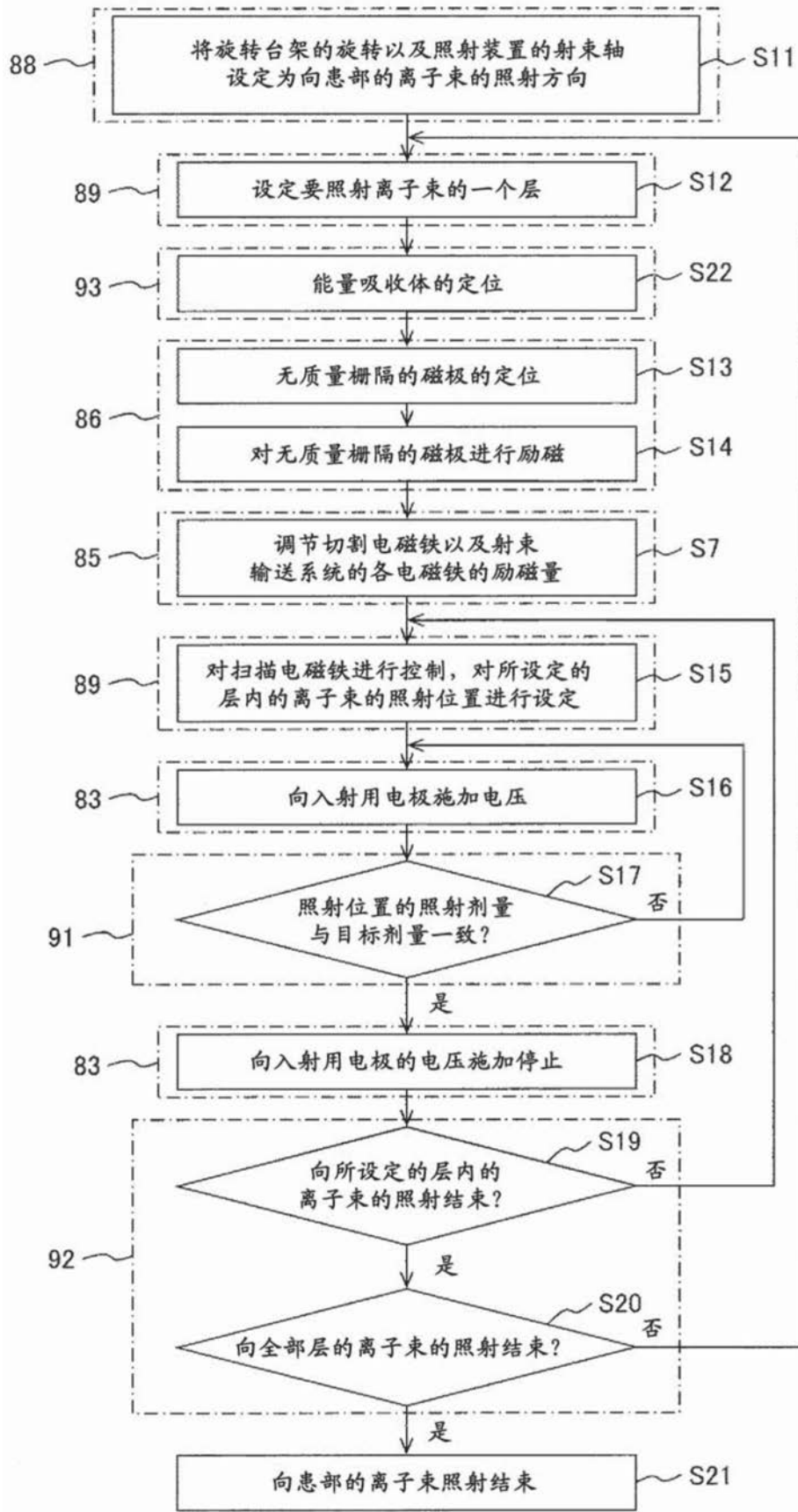


图35

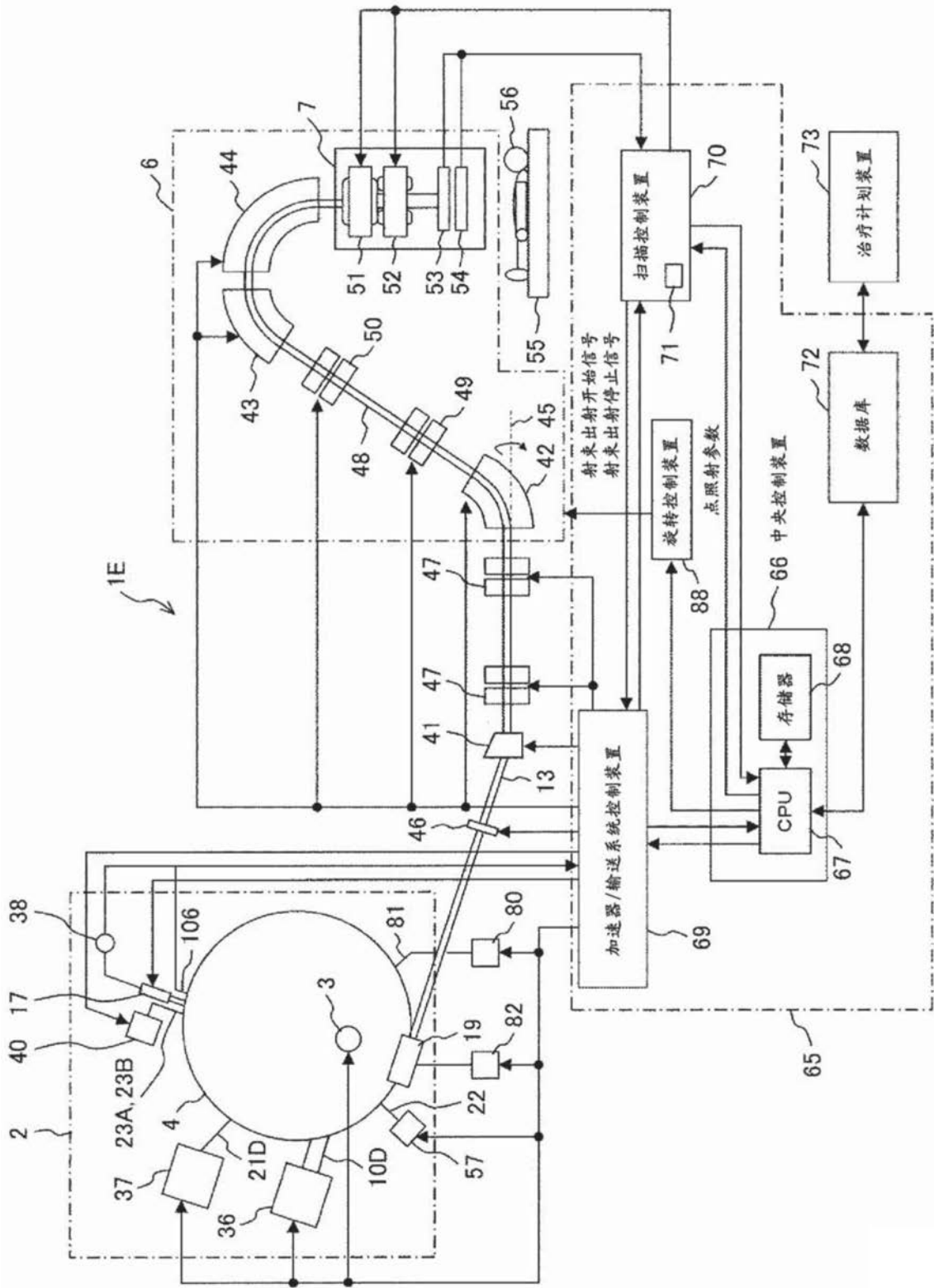


图36

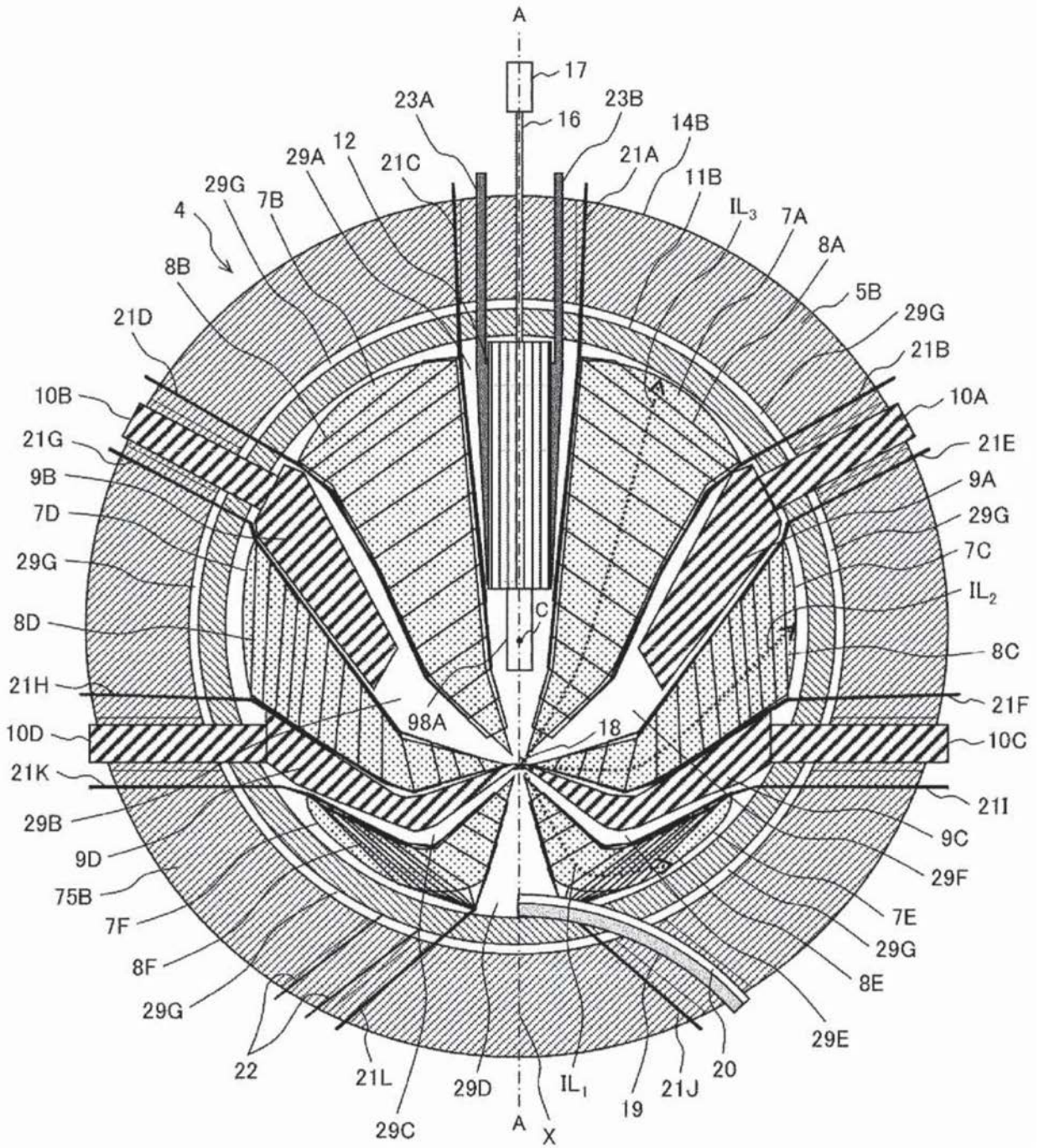


图37

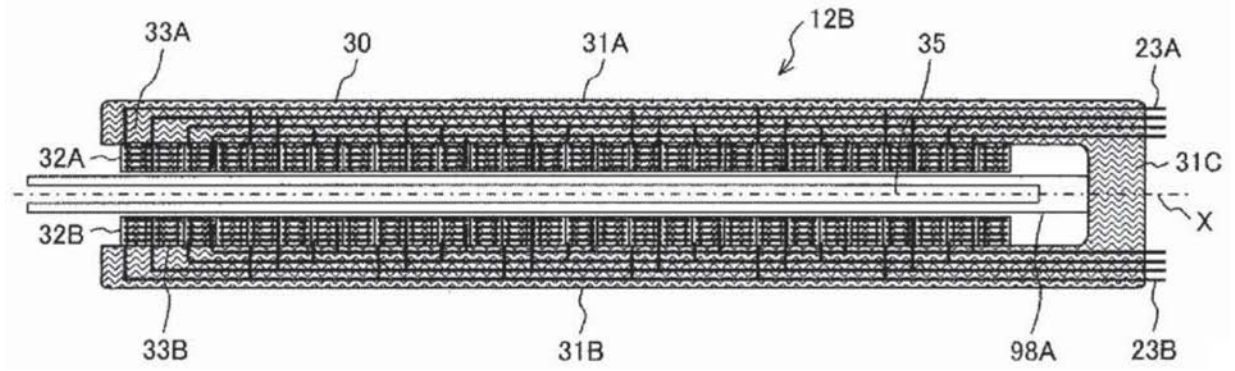


图39

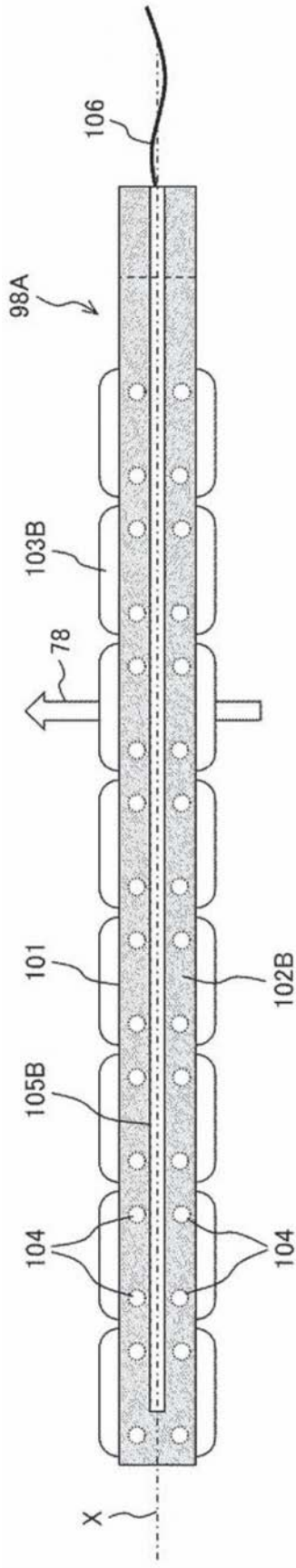


图41

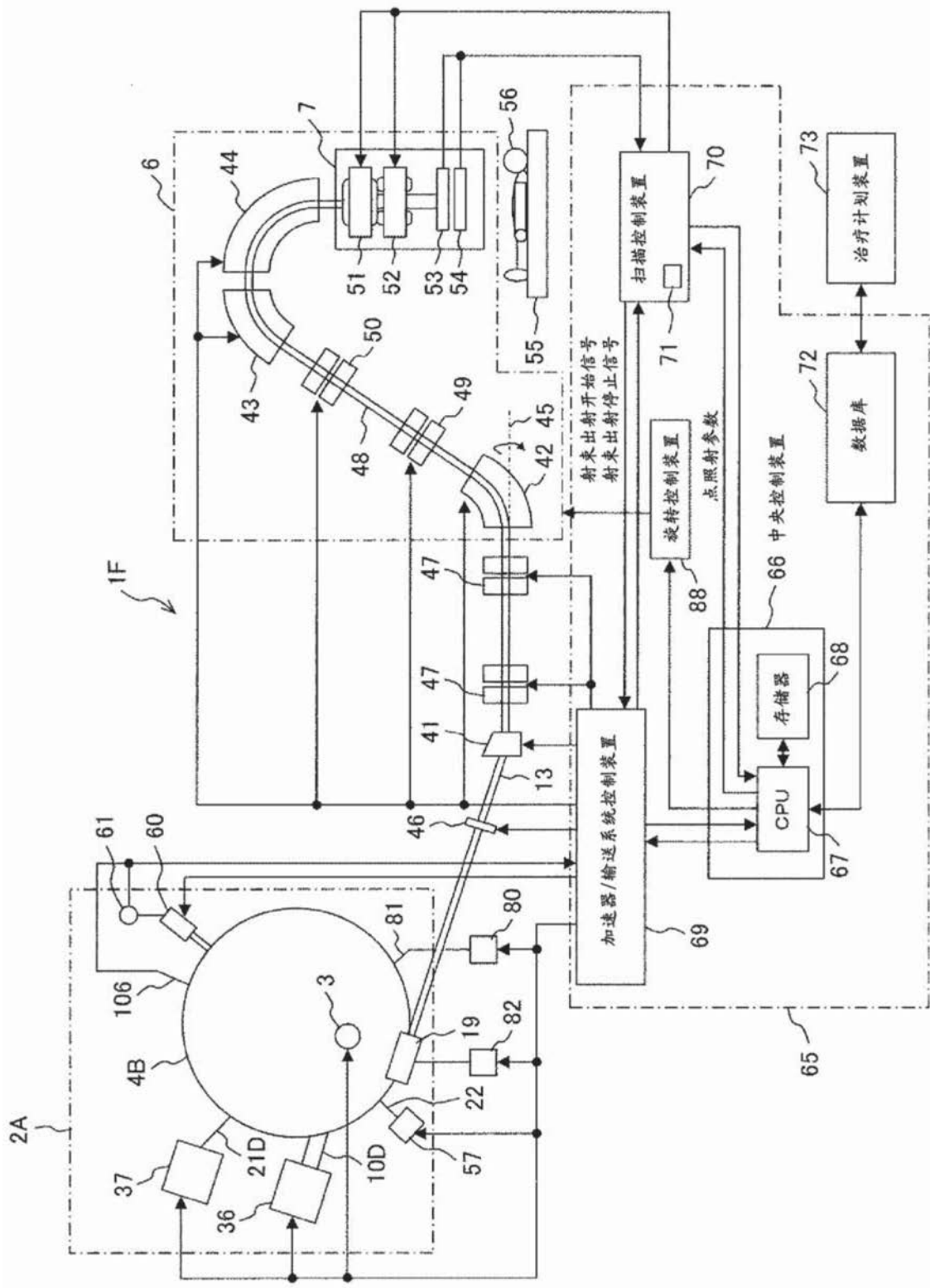


图42

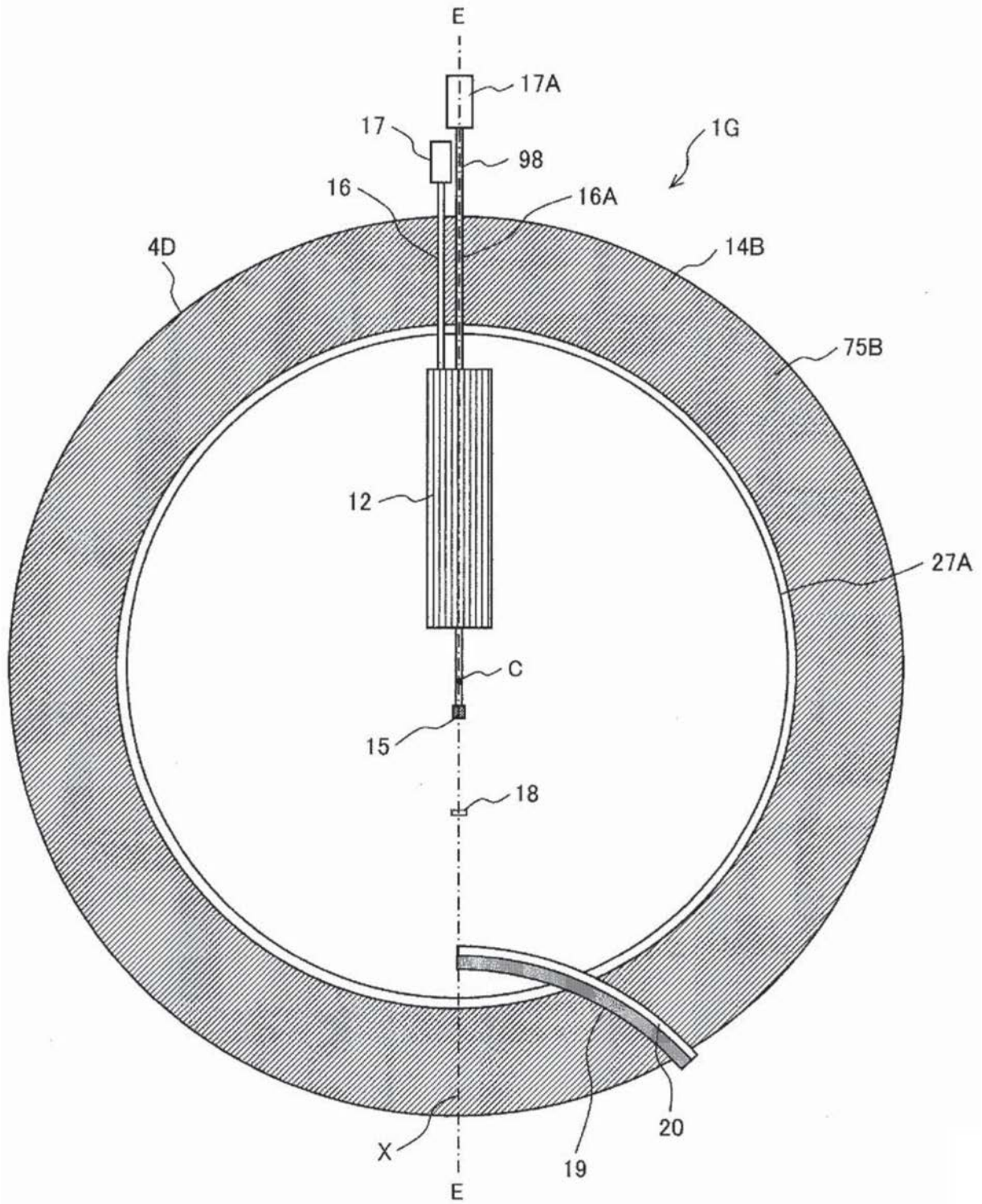


图44

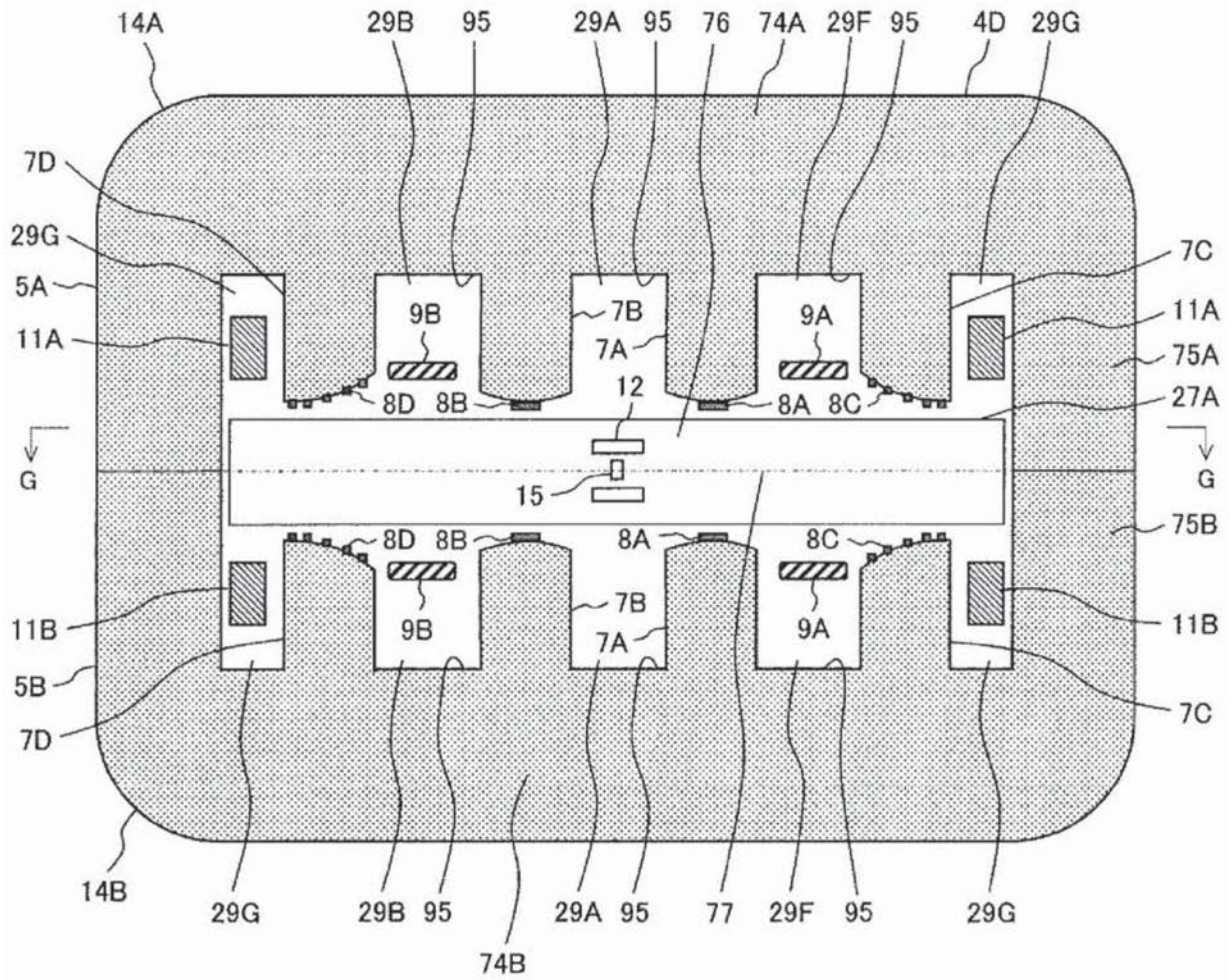


图46

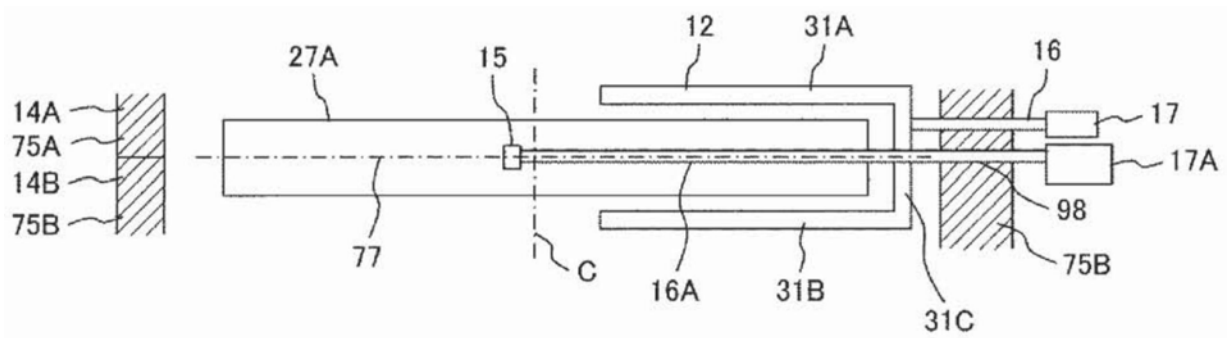


图47

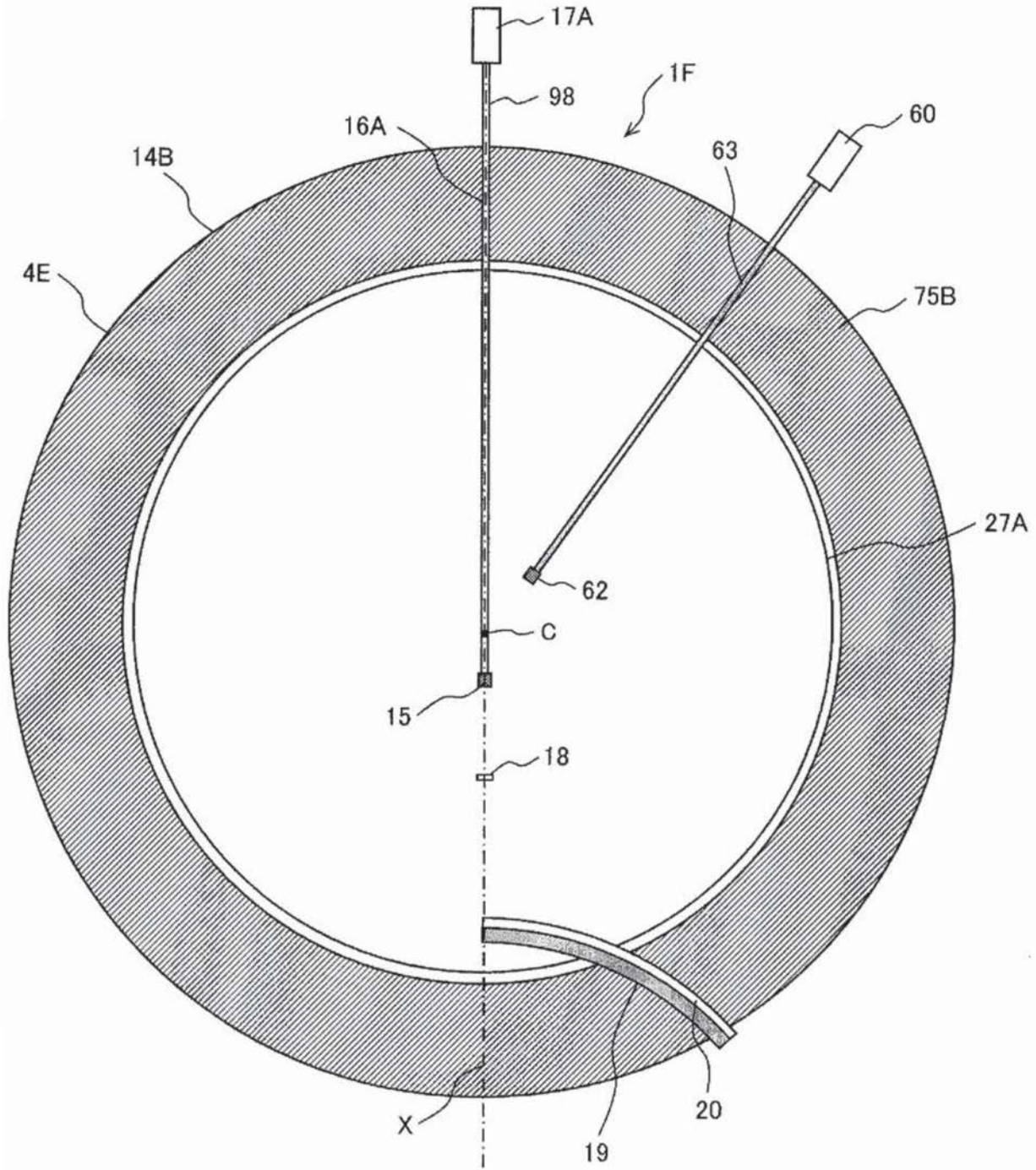


图48