

重离子治疗的物理与生物性能和装置原理

刘世耀

(中国科学院高能物理所 北京 100039)

半个世纪来,放射治疗界一直在寻找一种物理剂量分布良好和生物(物理)效应也好的放射线和粒子。几十年来的临床治疗实践,证实了常用的 X 射线和电子射线的物理剂量分布和生物(物理)效应都不理想。中子和负粒子的生物效应虽好,但是物理剂量分布不好,给正常组织带来太大的损害。当前较先进的质子治疗,固有的布拉格峰物理特性能使剂量分布很好,但其生物(物理)效应仅稍高于 X 射线和电子,对治疗抗拒型和乏氧型的肿瘤细胞还难以奏效。而重离子治疗的物理剂量分布和生物(物理)效应都很理想,因此人们转向研究重离子治疗的可能性。

从 1975 年美国加州劳伦斯贝克莱实验室(LBL)开始,直到最近在日本重离子医学加速器中心(HIMAC)和德国 GSI 研究所的重离子临床治疗实践,证实重离子既具有非常好的剂量分布,又有很好的生物(物理)效应。能有效的治疗其他射线难以治疗的抗拒型、乏氧型、内嵌型、尖畸型的肿瘤,从而引起放射肿瘤界的极大兴趣。当前日本、德国、意大利、奥地利、瑞典都已决定建造专用重离子治疗中心。笔者在今年第 2~3 期的《现代物理知识》中曾经介绍

过质子治疗的物理性能和工作原理,本文再介绍重离子治疗的物理与生物(物理)性能和装置原理。

一、重离子治疗的粒子种类

原则上一切由考克所组成的强子都是重离子,按理论推断,可能治疗的重离子有下述几种:重氢($^1\text{H}_2$)、氦($^2\text{He}_4$)、锂($^3\text{Li}_7$)、铍($^4\text{Be}_9$)、硼($^5\text{B}_{11}$)、碳($^6\text{C}_{12}$)、氮($^7\text{N}_{14}$)、氧($^8\text{O}_{16}$)、氟($^9\text{F}_{19}$)、氖($^{10}\text{Ne}_{20}$)、硅($^{15}\text{Si}_{28}$)、氩($^{18}\text{Ar}_{40}$)和氙($^{54}\text{Xe}_{132}$)。所有上述的重离子都具有像质子一样的布拉格峰物理特性,并且凡原子序数越大,其布拉格峰宽度越狭,后沿下降越快,剂量分布越好。图 1 表示珈玛射线,质子和碳重离子随人体内深度的剂量沉淀分布。由图 1 可见碳重离子的布拉格峰要比质子的布拉格峰更狭更陡。但判断重离子是否适合于肿瘤治疗,还必须考虑此重离子照射对正常组织的伤害程度。美国加州贝克莱实验室(LBL)和日本重离子医学加速器中心(HIMAC)在研究和临床实验基础上,已证实,对氩以上的重离子,由于直接给肿瘤前的正常细胞带来难以容许的伤害,不适用于肿瘤治疗。认为碳离子是适合治疗用的重离子。因此当前碳离子是作为重离子治疗的惟一粒子。

要解决集成的问题,就会带来另外一个问题:如何设计和制造纳米器件。纳米尺寸的物体难以预测的行为意味着工程师们在实际开始制造纳米机器之前将无法知道如何去制造它们。这个谜题的解决也许要花上很多年,甚至到那时也只能依靠反复试验和一点运气。

四分之一世纪之后

费曼的演讲传递了一个谨慎的预言。结尾时,他提供了两份各一千美元的奖金给创造出原子构筑体的人。其中一份所奖励的微型马达很快就被制造出来,尽管用的是传统的方法,工具是一根牙签、一台车床和一台显微镜。另一份所奖励的是把大英百科全书的所有信息放到一个大头针的头上,也就是

在只有普通大小的两万五千分之一的页面上书写。直到 1985 年后者才算是实现,只不过书写的是《双城记》的第一页。

哈佛大学高产的化学家乔治·怀特赛德估计,现在的纳米技术在通往成熟的道路上大概只走了一半。他确信纳米技术将会像生物技术一样在经历了强有力的研究之后产生出全新的制造方式。也许有一天,一种自驱动的微小装置将能够在人体内分辨癌细胞并将其杀死。到那时,纳米技术就将真正地改造材料科学和计算科学,并极大地影响生命科学。而这种局面也将带来对纳米伦理学的严肃关切。但是,将没有任何事物能够阻止纳米技术的发展。我们正在见证一场典型的技术革命。

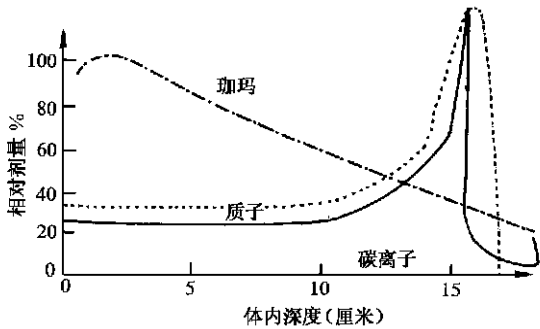


图1 伽玛、质子和碳离子在人体内的剂量分布

二、重离子的基本物理特性

1903年布拉格(Bragg)第一个发现Alpha粒子具有游离密度随着射程深度而增加的物理特性,后来进一步研究发现每单位射程中沉积的能量是和能量值成反比。当离子能量接近于零时,沉积能量密度突然上升为最大值,形成一个峰,后人就称此峰为布拉格峰,这就是布拉格峰的来源。而一切重离子都具有此物理性能,并且离子越重,此峰越狭。重离子在体内穿越时,还产生一种核分裂现象(Nuclear Fragmentation),即在相互碰撞中,将元素原子核中的中子从核中逸出,原来的原子形成更轻的放射性同位素,如将 C^{12} 变成 C^{11} (打出一个中子)或 C^{10} (打出两个中子)。这两种碳放射性同位素在衰变时,都能发出正电子,利用正电子断层扫描仪(PET)就能直接探测到重离子的行程轨迹和末端治疗终点位置,使实时诊断和精确治疗成为可能。这些物理特性是常用X射线、电子和质子所不具备的,是重离子治疗特有的优点。

重离子还有一个特点,即重离子不但单位行程中的游离能量密度比其他粒子(包括质子)要高,而且在离子附近物质中沉淀的微观能量密度分布是随着离粒子中心轨道的距离而变化,呈现出和距离成反比的规律,即近粒子中心轨道处的剂量可达兆Gy值,而远离粒子中心轨道处的剂量仅为毫Gy值,这种使局部剂量分布有很大的剂量梯度,极大的非均匀性有利于用重剂量将癌细胞杀死。重离子还有一个更特殊的优点。当离子射程接近布拉格峰时,被离子激发出的发射电子在前后两次碰撞间的平均自由行程(Main Free Path)可以达到10~20nm,此距离刚好与分子DNA两个基因链间的距离相同,因此具有直接切断DNA双链,直接杀死癌细胞的双链破坏DSB(Double Strand Breaks)功能,此功能是重离子能有效治疗抗阻型和乏氧型肿瘤细胞的主要原因。相

反对X射线、电子和质子治疗时,仅具有切断DNA单链功能SSB(Single Strand Breaks)。DNA本身有很强的修复能力,若不能在此切断单链的受伤DNA复原之前,再切断其另一根链,则癌细胞就不能杀死。这种间接杀死癌细胞的功能,是难以有效治疗抗阻型和乏氧型癌细胞的主要原因。

因此与X射线、电子和质子相比较,重离子的物理特性具有下述优点:后沿下降和横向散射都较小,肿瘤前部也受到较小剂量,单位能量沉积密度比质子高,具有双链破坏功能能直接杀死癌细胞,能用PET来实时监测末端停止点。其缺点是因核分裂现象产生一些比原始离子要更轻的重离子,这些较轻离子比原始重离子有更长的射程,从而在后沿下降下方有一个尾巴。此尾巴往往更接近敏感器官,给治疗带来不利。

三、重离子的生物效应

重离子的生物效应通常用相对生物有效性(Relative Biological Effectiveness,缩写RBE)表示,其定义是,当达到同一个治疗生存率时,用X射线治疗时所用的剂量值 D_x 和用该重离子所用的治疗剂量值 D_h 之比($RBE = D_x / D_h$)。此值越大表示该重离子的生物效应越好。通常都用治疗生存率10%值来定RBE值。图2表示不同离子的RBE值。

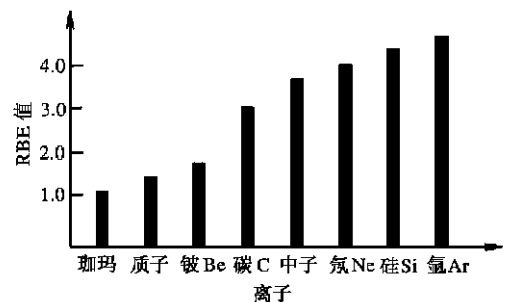


图2 不同离子的RBE值(RBE值越大越好)

当高能离子进入人体后,其速度逐渐降低,当其速度接近于停止时,不但LET值变大,更重要是局部的游离密度变得更大,这种局部高游离密度具有高度杀死肿瘤细胞的能力,因此在布拉格峰附近,尤其在布拉格峰末端处,往往RBE达最高值,随布拉格峰急速下降,RBE值也急速下降到零。碳离子在布拉格峰处的RBE值比质子的布拉格峰处的RBE值大3倍左右,因此碳离子比质子生物效应要好得多。

RBE值的大小和癌细胞的本身修复能力有关,越是容易修复,相应的RBE值越小。相反难于修复

的癌细胞,其对应 RBE 值越高。即凡具有双链切断 (DSB) 功能者,RBE 值高。反之只具有单链切断 (SSB) 功能,仅具有较小的 RBE 值。从此观点来看,质子只具有切断 DNA 单链功能 (SSB) 的功能,而重离子具有 DSB 的功能,这是重离子 RBE 值要比 X 射线、电子和质子高出 3 倍多的原因。

粒子的 RBE 值是一个多变量的函数,如质子的 RBE 值在肿瘤前部其值较低,在布拉格峰附近其值较高,最近发现在布拉格峰末端几个毫米处,其扩展布拉格峰 (SBOP) 的 RBE 值可高达 1.6。但目前临床治疗中都采用 RBE 值为 1.15 ~ 1.2 之间的单值处理。在日本 HIMAC 和兵库重离子治疗中心,碳的 RBE 值用一个 RBE 表 (RBE Table) 来处理。在德国 GSI 治疗中心已开始考虑到不同肿瘤位置的 RBE 值,即 $RBE = f(x, y, z)$ 关系,逐步接近真实情况。但离准确考虑 RBE 值的变量因素还有不少距离。

碳离子除去 RBE 值高以外,还有一个较小的氧增比 (Oxygen Enhancement Ratio, 缩写 OER), 氧增比定义为乏氧细胞和富氧细胞受到同样损伤时的辐射剂量之比。一般而言,正常细胞比较富氧,而癌细胞因增殖过快而往往缺氧,X 射线、电子和质子射线对缺氧癌细胞治疗效果很差。碳离子有一个较小的氧增比,意味着有效杀死乏氧的癌细胞。由于在多数肿瘤中都存在这种缺氧肿瘤细胞,因此能更显示重离子治疗的优点。图 3 表示不同离子的氧增比 OER 值。

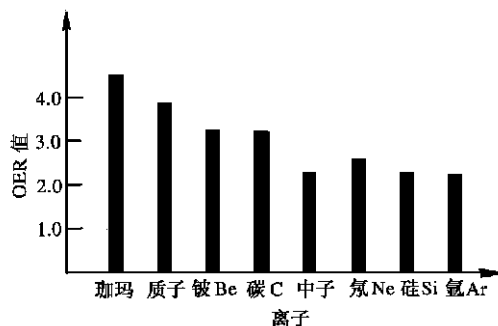


图 3 不同离子的氧增比 OER 值 (OER 值越小越好)

四、重离子治疗的基本设备和工作原理

为了实现重离子治疗必需有一套与质子治疗系统与装置相类似,但规模更大的重离子治疗装置和系统。重离子治疗的基本工作原理是和质子治疗的基本工作原理相类似,读者可参看《现代物理知识》2003 年第 3 期的“质子治疗的物理特性和工作原理 (下)”一文中的图 1,但对有关分系统则有不同要

求。下面我们简要地对与质子治疗不同要求部分的重离子治疗的基本设备工作原理和要求归纳叙述如下:

重离子束

重离子治疗首先要有一个重离子束,使重离子束能治疗体内射程深度为 3.5 ~ 20 厘米 (或 30 厘米) 的肿瘤,对碳重离子而言,则对应要求有一台最高能量为 340 兆电子伏/核 (对应 20 厘米射程) 或 430 兆电子伏/核 (对应 30 厘米射程) 的碳重离子加速器。由于目前 90% 的肿瘤患者的治疗射程都小于 20 厘米,而重离子加速器的价格和能量成正比,为得到最佳性能价格比,尽可能降低投资,目前重离子治疗不少都采用最大射程为 20 厘米的治疗参数,而不用质子治疗时的最大射程 30 厘米的治疗参数。

重离子同步加速器

重离子束固有的分裂效应,不允许重离子束在进入人体治疗之前穿过多的物质 (除去必要的散射器,能量调制器等部件),使分裂效应形成的较轻重离子产生过大的横向阴影和后沿下降,因此不允许用固定能量引出的加速器和用石墨降能器的能量选择器来调节离子束能量;即不能用当前质子治疗专用的固定输出能量的回旋加速器。目前世界上的重离子治疗用加速器,除去寄生于重离子物理研究所的重离子治疗中心如中国兰州近代物理所用回旋加速器产生治疗用的碳重离子外,所有已建和筹建的专用重离子治疗中心,如已建成的日本 HIMAC 和兵库,计划建造的德国 Heidelberg、瑞士 PSI-PROSCAN、意大利-Roma-TOP、LIBO、CNAO、奥地利的 MeD-AUSTRON、瑞典的 Karolinska 等重离子治疗中心都是无例外的采用能量可调的同步加速器来产生重离子。随着技术的进步,同步加速器的周长也做得越来越小,如日本的 HIMAC 同步加速器周长约为 130m (1994),兵库为 93.6m (2001),德国 Heidelberg 的同步加速器周长 64m (2006),日本 HIMAC 正在研制周长仅 50m 左右的新一代重离子同步加速器 (2010)。极大多数的同步加速器基本上都采用由 ECR 型离子源和 RFQ 型直线和 Alvarez 型直线加速器所组成的注入器。由于同步加速器可以调节束流能量,所以不再需要能量选择器,束流运输系统除去要求更高磁刚度的磁铁以外,和质子治疗束流运输系统相类似。

束流扩展系统和能量调制器

和质子治疗相类似,为了将加速器引出的束流

截面尺寸为几个毫米到厘米的束流能够辐照到整个肿瘤的横向尺寸,必须将加速器引出束流扩展成较大且均匀的束流来覆盖所有肿瘤的横向面积。因此也需要一个束流扩展系统。目前重离子用的束流扩展系统主要有两种;一种是由于日本重离子医学研究中心(HIMAC)和日本兵庫离子治疗中心的散射摆动治疗法,束流先通过一个散射体形成一个半径较大的粗束,再用两个摆动扫描磁铁进行扫描;另一种是德国 GSI 研究所重离子研究中心用的静态铅笔扫描法,用的铅笔扫描型治疗头的原理图,将加速器引出的细束直接通过两个 X 和 Y 方向的扫描磁铁进行扫描。同样,为了使离子束能照射到肿瘤的整个纵向深度,必须用一个能量调制器将离子束形成一个扩展布拉格峰(SOBP)。目前重离子用的能量调制器主要有两种;一种是日本重离子医学加速器中心(HIMAC)和日本兵庫离子治疗中心,用于散射摆动治疗法的“峰型过滤器”,又称“搓板式过滤器”(Ridge Filter),另一种是德国 GSI 研究所,直接调节同步加速器引出能量来进行铅笔扫描治疗,将 80 兆电子伏/核到 430 电子伏/核之间的能量细分为 256 步,从而在每层扫描时改变能量阶步来达到能量调制。

专用准直器和补偿器

和质子治疗相类似,要求对肿瘤(后部边缘)的束流射程能精细调节,不要越过边缘而辐照到肿瘤后的正常细胞。在治疗时也要一个精细能量调节器。对于用散射摆动法重离子治疗也要用患者专用准直器,使束流横向尺寸要与肿瘤病灶处的横向尺寸相同,使照射到肿瘤上下正常细胞处的离子流被准直器挡住,不再受伤害。此外肿瘤后沿边缘不是一个平面,而是一个不规则曲面,为此也需对每一个患者专门定制一个补偿器,其尺寸与患者肿瘤的后沿形状有关。患者治疗时,将此专用补偿器放在皮肤前部,使肿瘤后沿的正常细胞不再受到辐射伤害。对于用铅笔扫描法重离子治疗,可以直接用改变束流能量来控制射程,用扫描磁铁的驱动电流来控制束流横向行程,也就不再需要患者专用准直器和补偿器。

精密定位和门控系统

和质子治疗相类似,重离子治疗的患者精确定位十分重要。为达到精密定位,在每一个治疗室中,不论是旋转治疗头用的治疗床,还是固定治疗头用的治疗椅,都要配置一套患者精密定位和准直系统,

定位精度小于 0.5mm。同样为了满足对肺、肝等肿瘤的动态治疗,动态治疗是指在治疗某些内脏肿瘤时,肿瘤形状要动态变化,如肺肿瘤在吸气时,肿瘤变大,在呼气时肿瘤形状变小,肿瘤形状大小变化和呼吸规律同步。为达到最佳治疗效果,要用呼吸探头找出患者的呼吸随时间的变化规律,或者利用肿瘤形状大小变化和皮层上下位移的同步规律,直接测量相应部分皮肤的上下位移变化值,来实时反映肿瘤形状变化的规律。在治疗时用此呼吸或位移变化规律来控制质子束流。这种用呼吸门或位移控制质子流进行同步治疗的装置,叫呼吸或位移门控系统。在 CT 诊断室和每个旋转治疗室都应该配置。至于重离子治疗有关剂量测量与验证;束流测量系统;患者专用准直器与补偿器加工等都和质子治疗的要求相同。

重离子旋转治疗台

和质子治疗相类似,为减少皮肤与肿瘤间的正常细胞的伤害。重离子治疗时也希望能有一个旋转治疗台。此在技术原理上不存在任何困难,但在实施中,由于碳离子要比质子重得多,要把碳离子偏转 100 多度,则要求磁铁有一个很大的磁刚度 B,而目前除超导外,常规钢材的饱和磁场难以再变高,因此只有加大曲率半径,即将装置做成又大又重才行,需要更大的占地和空间,大大增加投资。因此日本重离子医学加速器中心(HIMAC)和日本兵庫离子治疗中心都用三个分别是 0 度(水平)、90 度(垂直)和 45 度(倾斜)的固定治疗头来代替旋转治疗台的功能。德国海登堡等重离子治疗筹建中心有研制重离子旋转治疗台的计划,但到目前为止,还没有一台应用的重离子旋转治疗机架。估计要待 2006 年后才有重离子旋转治疗台投入使用。

重离子治疗计划系统

重离子治疗同样要有一个重离子治疗计划系统(TPS)应用软件和质子治疗计划系统(TPS)相比,除去许多功能外,如重建三维立体图像,确定患者治疗用专用准直器与补偿器物理加工尺寸等相同外,还要复杂得多,这是由于质子治疗是基于物理剂量来进行治疗规划,而重离子治疗是基于生物剂量来进行治疗规划,二者的基点完全不同。前者目前只将生物效应 RBE 值作为一个定值来考虑,而后者必须将生物效应 RBE 值作为一个变量来考虑,即 RBE 值是癌位置,癌种类和生长周期等的函数。虽然目前的重离子治疗还不能将所有变量都考虑进去,但至

少要作近似的考虑。如日本三菱生产的 TPS 中有一个 RBE 变量表,德国的 GSI 已考虑 $RBE = F(x, y, z)$ 的函数关系。此外重离子治疗计划系统(TPS)中还必须考虑分裂效应所带来的一切影响。因此当前重离子治疗还处于发展阶段,达到完善成熟还需要一定的时间。

五、国际上的重离子治疗装置

日本重离子医学加速器中心(HIMAC)

日本重离子医学加速器中心是世界上第一个专门研究重离子癌症治疗的中心,于 1994 年 6 月开始进行治疗,图 4 表示该中心的装置系统原理图。由图可见它装有两台完全相同的同步加速器,彼此上下相距十米,每台同步加速器周长为 130 米,加速的离子最高能量为 800 兆电子伏/核子。同步加速器用一台 6 兆电子伏/核子的预注入器将离子注入后,在同步加速器内加速,再用慢引出将重离子送各治疗头。预注入器是由一台 8 兆电子伏/核的潘宁(PIG)型和 ECR 型离子源,一台长 7.3 米的 800 千电子伏/核的 RFQ 型直线加速器和一台 6 兆电子伏/核的长 24 米的 Alvarez 型直线加速器串接所组成。该预加速器可加速氦 He、碳 C、氮 N、氧 O、氖 Ne、硅 Si 和氩 Ar 等多种重离子。

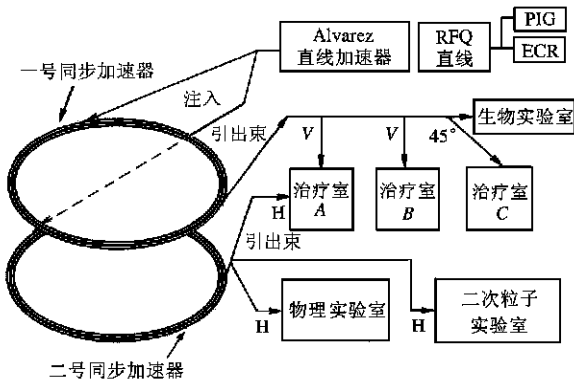


图 4 日本 HIMAC 重离子治疗中心系统原理器

同步加速器的离子引出能量的可调范围为 75 ~ 800 兆电子伏/核,离子流强在每 3.3 秒周期内为 10^9 粒子,慢引出的时间约 0.3 ~ 2 秒。一号同步加速器束流通过输运线引向 4 个治疗室,即治疗室 A 的垂直治疗头、治疗室 B 的垂直治疗头、治疗室 C 的 45 度倾斜治疗头和一个水平方向束流的生物实验室。二号同步加速器束流通过输运线引向 3 个治疗室,即治疗室 A 的水平治疗头(因此治疗室 A 具有同时在垂直和水平方向照射的功能)、具有两个水平束口的物理实验室和具有两个水平束流口的次级

粒子照射室。

日本重离子医学加速器中心从 1994 年至今共治疗了一千多名患者,其中 16% 为头颈部肿瘤,15% 为肺癌,11% 为肝癌,11% 为前列腺癌,8% 为骨和软组织癌,5% 为子宫癌,所选择治疗的癌症都是 X 射线,电子,质子难以治疗的癌症,平均治疗的二年局部控制率优于 70%。尤其对于肺癌、肝癌疗效更好,照射次数仅需 2 ~ 4 次。

日本兵庫离子束医学中心

(Hyogo Ion Beam Medical Center, Japan)

日本兵庫离子束医学中心是世界上第一台由日本三菱公司生产的商品化的专用重离子治疗的中心,于 2001 年 4 月建成,2001 年开始进行治疗,质子治疗部分已在 2003 年 3 月经日本厚生省批准正式治疗。碳重离子治疗部分预计要在 2004 年 3 月日本厚生省批准后正式治疗。它装有一台同步加速器,周长为 93.6 米,能加速 70 ~ 230 兆电子伏的质子和 70 ~ 320 兆电子伏/核的碳重离子两种粒子。同步加速器用一台 6 兆电子伏/核子的预注入器将离子注入后,在同步加速器内加速到所需最高能量后,再用慢引出将重离子送各治疗头。预注入器由两台可切换质子或碳离子的 ECR 型离子源,一台长 7.3 米的 800 千电子伏/核的 RFQ 型直线加速器和一台 6 兆电子伏/核的长 24 米的 Alvarez 型直线加速器相串接所组成。

同步加速器束流通过输运线引向 6 个治疗口:两个旋转治疗室,一个具有垂直和水平治疗头治疗室,一个水平治疗室,一个 45 度倾斜治疗头的治疗室,总共 6 个治疗口,5 个治疗室,所有 6 个治疗口都能用于质子治疗,但在碳离子治疗时二个旋转治疗室不适用,质子治疗和碳粒子治疗不能同时用,一般可上午分开治疗,即上午用于质子治疗,下午用于碳重离子治疗,两种粒子的切换时间约需 1 小时。

德国 GSI 研究所的碳离子治疗中心

德国 GSI 研究所是一个重离子物理实验研究所,从该所的同步加速器上引出一条重离子束线从事碳离子治疗研究,而有关治疗研究部分工作是由海德堡放射治疗中心和德国癌症研究中心负责。1993 年夏天开始建造,1997 年 12 月开始治疗,至今已治疗了近 150 名患者,其治疗效果不仅很好,尤其是该中心所采用的治疗手段和方法是当前重离子治疗中最先进的方法,具有优良的创新特色,现简要介绍如下。

该治疗中心采用静态铅笔扫描型治疗头,在治疗时不仅可用于适形治疗方法,也能用于调强治疗方法,从而大大提高治疗精度和治疗效果。并且在治疗时不需用患者专用准直孔径和补偿器,可节省加工制造和治疗费用,避免了大量活性材料的处理麻烦。

由于铅笔扫描治疗法对加速器引出的束流质量有严格的要求,即要求束流的位置,束流的截面分布和流强提出很高的稳定性要求,若这几个束流参数有任何超过容许的微小偏差,都会影响治疗时的剂量均匀度,带来不良的治疗后果。此外为了要满足治疗时的治疗要求,还必须能又快又精确地调节加速器引出束流的参数;如束流能量,流强,束斑尺寸等。这种对加速器束流参数进行快速调节和高稳定性的质量要求是实现铅笔扫描型治疗方法的关键难点。GSI的加速器科研人员在同步加速器进行了大量富有创新的改进工作,他们将加速器运行成一个“虚拟机器(Virtual machine)”,具有256种不同的运行工作模式,每一种工作模式都对应有特定的引出束流参数,包含一个很大的束流能量,束流强度,束斑尺寸的动态变化范围。这样允许对每一个引出束流脉冲运行某一种运行工作模式来达到所要求的束流参数。此外还利用各种反馈稳定回路来稳定束流位置,流强等参数,从而达到快速稳定调节束流参数的高要求。

在患者照射治疗区装有正电子发射影像诊断装置(PET),可以对碳 C_{12} 离子分裂出来的碳 C_{11} 的正电子进行检测,从而能对肿瘤的后沿治疗射程和其终点进行实时诊断,以验证治疗的效果是否和要求一致,PET的空间分辨达2.5毫米。

为了确保束流位置和强度在治疗中的任何时刻不会因偏离允许值而对照射区邻近的敏感器官带来严重损害,采取下列安全措施;在患者的照射前面直接装有一个多丝束流位置游离室探头和一个束流强度游离室探头,前者每120微秒测量记录一次,后者每隔12微秒测量一次。只要有一次测量值大于允许值,立即停止束流。

德国海登堡离子束治疗中心

德国海登堡离子束治疗中心是一个正在筹建中的专用重离子治疗中心。中心具有二个重离子旋转治疗室,一个固定束治疗室和一个在输运线末端的“治疗质量保证”用束流测量线。治疗用重离子有低LET的质子P和氦He和高LET的碳C和氧O。离

子在水中的射程为20~300毫米,重离子能量为50~430兆电子伏/核子,引出时间为1~10秒,束流在横向和纵向直径为4~10毫米,最高束流强度是随不同离子而异,约每个周期内的离子数在 $1 \times 10^6 \sim 4 \times 10^{10}$ 。

海登堡离子束治疗中心的加速器系统可代表当前国际上最先进的重离子治疗医用加速器系统。离子源是用具有长时间内高稳定性流强的ECR离子源。要求的离子流强是在80微安(对氧 $6+$)和1.2毫安之间,从离子源引出的粒子流,先通过一台用来匹配直线脉宽用的斩波器。将连续的离子源流强斩成约200微秒的脉冲流强再进入到一台总长6米的RFQ型直线加速器,并将离子加速到7兆电子伏/核子,直线加速器的束流参数为:高频频率216兆周/秒,脉冲宽度是200微秒,最高重复频率是5周/秒。规一化后的束流发散度是0.8毫米,毫弧度。最大能散度是 $\pm 1.5\%$ 。为了提高多圈注入的注入效率,在将直线加速器输出束流注入到同步加速器之前,在高能输运线上还装有一台去聚束高频腔,用来降低同步加速器注入束流的能散度。主加速器为一个周长64米的同步加速器,具有6个偏转磁铁,有四个长和两个短直线节,用来安装注入,引出和高频加速腔。注入是用15到20圈的多圈注入,相应的注入时间是30微秒。在一秒内能加速到最高引出能量。束流脉宽度是3秒,平顶部分为2秒,脉冲负载因子为60%,在用慢引出时引出时间可在1~10秒内变化重离子的旋转机架是和SEAG公司(建造瑞士PSI研究所质子治疗用的旋转机架公司)合作生产。该旋转机架的直径小于15米,全部总尺寸约20米,总重600吨,随不同角度变化的最大的角变形约0.3毫米,由此引起的旋转机架等中心的位置变化约1.5毫米。

瑞典斯得哥尔摩中心的重离子治疗

瑞典斯得哥尔摩中心重离子治疗中心就是瑞典的Karolinska重离子治疗中心,该中心医学专家认为,若要求达到宏观和微观剂量均匀度的统一,消除冷点带来的后效应,避免今后再有复发的可能性提出今后有两种最优的肿瘤治疗方法。一种是选用较轻的锂Li、铍Bi重离子单独地照射治疗;一种是用重离子、X射线两种复合放射治疗法,通常称为“增强治疗”法。

氦He、锂Li,甚至铍Bi单独照射治疗

质子束的RBE值都是1.1~1.2。而锂、铍重离子

现代物理知识

磁悬浮列车的发展及其应用中的几点想法

屈炜 张洁 沈嘉 施雨阳

(西北大学物理系 2000 级基地班 西安 710069)

磁悬浮列车的概念最早是由美国提出来的,后来,德国、法国、日本等国相继效仿,都进行了开发与试验。

磁悬浮列车是一种与传统方式完全不同的崭新列车。它不是用普通机车牵引,而是靠通过磁场推动。它不接触导轨,而是靠一种看不见的“磁垫”使这“悬浮”在导轨上。研制磁悬浮列车要解决许多问题。首先是悬浮、前进问题。对于列车的车身和轨道也有较高的要求。

一、磁悬浮列车原理

悬浮作用只在列车行驶时才有。行驶时磁铁产

生的磁力线切割地面上的短线圈,使线圈产生感应电流,这一电流引起的磁场,极性正好与车体上磁体的极性相同。因此产生相互排斥的作用力,使得车体悬浮起来。在停车时,由于没有感应电流,所以没有悬浮力,列车便停在轨道上。在列车启动的最初阶段,列车也悬浮不起来,还得靠车轮在铁轨上行驶。通过计算机传感器测量控制列车悬浮的高度,使其保持稳定。

其前进原理是利用直线运动推动车体前进的线性马达使列车向前飞奔,并且列车上装有供驱动方向的电磁铁(如图 1)。

在扩展布拉格峰前面接近皮层的正常组织处的 RBE 值很小。而在布拉格峰处的 RBE 值变成较大,能具有质子治疗时的正常组织小损害,又具有碳重离子的治疗效果。即具有杀死癌细胞 DNA 双链功能,有效治疗抗阻型和缺氧型肿瘤。此外,锂、铍重离子的核分裂效应要小于碳重离子的核分裂效应,更适合用于治疗在纵向接近敏感器官的肿瘤,锂、铍重离子治疗时的微观剂量不均匀度(约 1%),要比碳离子治疗时的微观剂量不均匀度(约 10%)要好得多,从而由此导致的冷点和后效应问题就不再严重,计划是每个患者平均在 4 周内照 18 次。

复合放射治疗法

复合放射治疗法的特点是充分发挥各种放射粒子的优点,又尽量克服各种放射粒子的缺点,达到“用其所长,抑其所短”的综合治疗方法。首先要发挥碳重离子的高 LET 和高 RBE 的有效治疗抗阻和缺氧型肿瘤特点和避免对肿瘤前正常组织的损害,要用高精度诊断装置和尽可能的高准确度的剂量分布进行高精度碳重离子治疗,平均在 1 周内照 5 次,所用的物理剂量值约 5~10Gy,相当于生物有效剂量 10~30Gy。通过这种碳重离子治疗后,往往使辐射感应的氧恢复过程变得有效,乏氧状态有所改善,使低 LET 的 X 射线,电子或质子治疗成为有效时,再平均在 3 周内,用低 LET 射线进行治疗 15 次,所用的物理剂量值约 50~70Gy(用调强 X 射线进行治

疗更佳)。随后的这种低 LET 的射线治疗具有很好的微观剂量不均匀度,因此也完全克服了碳重离子治疗中的冷点和后效应的缺点。

重离子治疗系统

重离子产生系统由下列部分组成:采用若干个电子回旋加速器谐振型(Electron Cyclotron Resonance)的 ECR 型离子源,或一个能在加速器束流脉冲周期之间快速进行不同类型离子源切换的 CRYEBIS 型离子源,然后用一台直线加速器加速到 7 兆电子伏,直线加速器输出的离子再打在一个薄膜上,将离子外层的电子全部剥夺掉后再注入到一个直径 24 米、周长 75.5 米的同步加速器中,加速时间是 0.5 秒,慢引出时间 1~4 秒,引出束流强为 4×10^{10} 质子/秒和 2×10^8 碳离子/秒。总共有 5 个治疗室;二个水平治疗头,一个具有水平/垂直治疗头,并带有在线正电子 PET,第四个是旋转治疗室,第五个是计划用于 50 兆电子伏高能光子窄扫描,也允许通过患者体内的碳、氮、氧元素上的光子核反应,用 PET 来拍摄所传递的剂量分布。计划治疗时间在第一年每个患者需 30 分,第三年 20 分。在正式治疗 4 年后,每年工作 220 天,每年治疗 21000 次(用 3 个治疗室时),每个患者平均要 7.5 次(假定 20% 患者用氦 He、锂 Li,甚至铍 Bi,进行单独地照射治疗,平均每个患者要照 18 次,80% 患者用复合放射治疗法,平均每个患者要照 5 次),即计划治疗人数每年 2800 患者。