

高能质子加速器治疗系统应用中的环境安全问题

刘原中¹, 唐鄂生², 李建平², 顾洪坤³

- (1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084;
2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039;
3. 北京市辐射环境管理中心, 北京 100037)

摘要:通过对1台能量为235 MeV的质子加速器治疗系统的辐射安全分析,阐明了高能质子加速器运行时可能带来的一些环境安全问题。分析表明,高能质子加速器运行可能带来的主要环境影响有:中子和射线引起的辐射剂量、空气的活化、设备冷却水的活化、土壤(及地下水)的活化、加速器结构材料的活化以及臭氧等有害气体的产生等。计算结果表明,只要整个系统的设计具有良好的屏蔽系统、通风系统以及防止人员误入强辐射区的安全联锁系统,高能质子加速器治疗系统的运行对周围公众的安全是能得到保障的。

关键词:质子加速器;医疗系统;环境影响

中图分类号:X837

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2004)S0-0192-05

The Problems of Environmental Safety for Application of High Energy Proton Accelerator Therapy System

LIU Yuan-zhong¹, TANG E-sheng², LI Jian-ping², GU Hong-kun³

- (1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Beijing Radiation Environment Management Center, Beijing 100037, china)

Abstract: The environment safety problems resulted from the operation of high energy proton accelerator are described based on the analysis of radiation safety for a 235 MeV proton accelerator therapy system in the paper. The primary environmental impact resulted from the operation of high energy proton accelerator is as follows: 1) radiation dose from neutron and γ -ray to men; 2) the activation of air; 3) the activation of component cooling water of accelerator; 4) the activation of soil (and groundwater); 5) the activation of material of accelerator components; 6) producing harmful gases (such as O_3 , NO_2 and HNO_3). The calculated results show that the safety of men around the

收稿日期:2004-04-15;修回日期:2004-05-13

作者简介:刘原中(1939—),男,重庆涪陵人,研究员,辐射防护与环境保护专业

accelerator can be ensured during high energy proton accelerator therapy system operation, so long as it has fine design and construction for shield system, and ventilation system, and safety interlock system which it is used to protect person going incidentally into the high radiation area.

Key words: proton accelerator; therapy system; environment impact

目前我国自然人口肿瘤发病率约为千分之二至千分之三,即每年约有 240 万发病的肿瘤病人,其中适应于放射性治疗的人约 80 万人,而适合质子治疗技术治疗的病人约为 60 万人。

利用高能质子来治疗肿瘤的优点在于:由于质子在物质中穿行时的 Bragg 现象,即在行进过程中能量损失很小,而大量能量损失于射程的终点,因而质子在穿行肌体组织过程中对沿途的细胞破坏作用很小,而对肿瘤细胞的杀伤作用很大。质子在肌体组织中的射程取决于质子的能量,根据肿瘤的深度,调节入射质子的能量,使质子的射程正好到达肿瘤部位,杀死肿瘤细胞,而对正常的组织细胞破坏很小,大大提高了肿瘤患者的生存质量。

目前,中日友好医院从比利时 IBA 公司进口 1 台可把能量加速到 235 MeV 的质子加速器治疗系统(简称 PTS),用于治疗肿瘤。

质子治疗系统的核心是质子加速器,被加速的高能质子在能量选择及传输过程中都会有质子束流的损失,损失的质子撞击在周围的结构材料上会与材料中的原子发生核反应,即高能质子入射到原子核内后与该核内的核子发生级联碰撞、交换能量、打出能量很高的级联中子,在激发核退激过程中又会释放出能量较低的蒸发中子,并伴随有 γ 射线的发射,级联中子和蒸发中子由于慢化会变成热中子。这些中子和 γ 射线会带来一些环境安全问题。下面以 PTS 为例来对这些环境安全问题进行描述。

1 中子和 γ 射线的产生和屏蔽

1.1 质子束流损失及中子产额

对于任何质子加速器,在质子束流的形成、加速、传输、引出以及对束流能量和截面的调整过程中均不可避免地发生束流损失,损失的质子与加速器的部件,如磁铁、选能器、准直器、夹缝、束流阻挡器等物质的原子发生相互作用(称为打靶),由此产生大量中子和 γ 射线。束流损

失点正是瞬发辐射的源点,是屏蔽计算的出发点。

高能质子打靶时产生的级联中子能量可达到被加速的质子能量,对于 PTS 来说,即为 235 MeV。高能中子的穿透能力很高,因而对于高能质子加速器的屏蔽问题主要是针对高能中子的屏蔽,对蒸发中子和 γ 射线一般可以不考虑。

质子打在靶物质上的中子产额依赖于入射质子的能量和靶物质的材料,质子能量一般在 50~500 MeV 时,总中子的产额正比于质子能量的平方。文献[1,2]分别给出了不同能量的质子打在某些靶物质(C、Al、Cu、Fe、Su、Ta、Pb 等)上的总中子产额及其角分布。根据文献[1,2]本工作推算出了 PTS 系统质子打靶(Fe)时的中子总产额为 1,其中,级联中子为 0.048。

对于 PTS 质子治疗系统,比利时 IBA 公司根据系统的设计提供了所有束流损失点(共 18 处)处的质子能量、质子流强、束流损失率、靶材料及损失频率。根据这些基本参数,本工作计算了各束流损失点处的束流损失流强,进而计算出各损失点处的中子和 γ 射线的辐射源强。

1.2 屏蔽层外的辐射剂量

Moyer 模型是质子加速器屏蔽计算的基本方法。利用 Moyer 积分的简化假设,推导出点源和线源的中子屏蔽计算公式^[1,3]为:

$$D_p = S_p H(\theta) \frac{1}{r^2} e^{-d/r} \quad (1)$$

$$D_L = S_L H(\theta) \frac{2}{r} e^{-d/0.89r} \quad (2)$$

式中: D_p 、 D_L 分别为对点源和线源屏蔽层外的剂量率, Sv/s; S_p 为单位时间内在束流损失点处损失的质子数, s^{-1} ; S_L 为单位时间内在单位束流损失线上损失的质子数, $s^{-1} \cdot m^{-1}$; $H(\theta)$ 为单个质子打靶时,在距靶 1 m 处中子引起的剂量, $Sv \cdot m^2$; (θ) 为中子在屏蔽层内的衰减长度, g/cm^2 ; θ 为入射质子与出射中子之间的夹角; r 为源点到剂量计算点之间的距离, m ; d

为屏蔽层的质量厚度, g/cm^2 。

从文献[1,3]可查到对于级联中子的 $H(\mu)$ 和 μ 值,它们是质子能量、靶材料及 μ 的函数。

根据 IBA 公司提供的 PTS 的设计参数及屏蔽层的厚度、布置及设计,本工作计算了各屏蔽层外的辐射剂量率。计算结果表明,绝大多数的屏蔽皆能满足我国辐射防护标准的要求,但有 3 处的屏蔽能力较弱,不能满足我国辐射防护标准的要求。提出改进措施后,公众成员受到的最大年剂量小于 0.08 mSv,低于国标 GB5172—85 中规定的年剂量限值 0.1 mSv。

1.3 中子的天空散射引起的辐射剂量

在考虑中子和 γ 射线对公众引起的辐射剂量时,还必须考虑穿过屋顶进入天空的中子和 γ 射线,在大气空气中分子、原子的散射作用下有部分中子、 γ 射线会反散射到地面上,对附近的公众引起辐射照射。

对于中子的天空散射可采用以下经验公式进行计算:

$$D(r) = \frac{Q}{4r^2} (1 - e^{-\mu r}) e^{-\mu r} \quad (4)$$

式中: $D(r)$ 为与靶距离 r 处天空散射引起的中子注量率, $cm^{-2} \cdot s^{-1}$; μ 、 μ_0 为有关参数^[4]; Q 为射入天空的中子源强, s^{-1} ,该值通过屏蔽计算求得。

对于 PTS,由于顶部屏蔽能力很强,因而此项对环境的影响很小。计算结果表明,公众成员受到的最大年剂量小于 10^{-4} mSv。

2 空气的活化和排放

2.1 空气活化造成的气载放射性流出物的排放量

高能级联中子会引起空气中 N、O 的散裂反应而生成 3H 、 7Be 、 ^{11}C 、 ^{13}N 等放射性核素;蒸发中子将引起 ^{16}O 的 $(n,2n)$ 反应产生 ^{15}O ;级联中子和蒸发中子在屏蔽层及系统设备材料中经弹性和非弹性碰撞慢化后变成热中子又进入空气而引起 ^{14}N 的 (n,p) 反应产生 ^{14}C 以及 ^{40}Ar 的 (n,α) 反应产生 ^{41}Ar ;还有其它一些由散裂和俘获反应产生的半衰期小于 1 min 的核素,如 ^{14}O 、 ^{19}O 、 ^{16}N 、 ^{17}N 等。

针对 PTS 的实际情况,推导出每天向环境

释放的放射性活度为:

$$Q_i = FB [T + \frac{1}{\lambda_i} (e^{-\lambda_i T} - 1)] \quad (5)$$

$$B = \frac{2R_0 \mu_0 Y A_0 f_n f_m}{GV} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i T_0}}{1 - e^{-\lambda_i s}} \\ = \mu_0 + F/V$$

式中: Q_i 为每天向环境释放的核素 i 的活度, Bq/d; R_0 为束流损失点所在房间空气体积的等效球半径,cm; λ_i 为核素 i 的衰变常量, s^{-1} ; μ_0 为核反应生成核素 i 的母核的核反应截面, cm^2 ; Y 为该束流损失点的中子产额, s^{-1} ; G 为空气的密度, g/cm^3 ; A_0 为阿佛加德罗常数; f_n 为母核的天然丰度; f_m 为母核元素在空气中的质量百分比; G 为母核的摩尔质量, g/mol ; V 为束流损失点所在房间的空气体积, cm^3 ; F 为束流损失点所在房间的通风速率, cm^3/s ; T 为每天的通风时间, s ; T_0 为每次产生束流的时间, s ; s 为两次束流之间的循环时间, s 。

计算结果表明,PTS 系统运行时每年排到大气环境中的放射性总活度为 2.67×10^{12} Bq,排放浓度为 6×10^4 Bq/m³,主要核素是 ^{13}N 、 ^{11}C 和 ^{41}Ar 。

2.2 气载放射性流出物排放对公众引起的辐射剂量

根据上面给的各处放射性核素的排放量及中日友好医院所在地区的天气条件,计算了气载放射性流出物排放对公众引起的辐射剂量。计算结果表明,公众可能受到的最大个人有效剂量,成人为 4.9×10^{-4} mSv/a,儿童为 5.8×10^{-4} mSv/a,主要照射途径来自空气浸没外照射,关键核素是 ^{13}N 。

3 设备冷却水的活化

高能质子加速器设备冷却水中的 ^{16}O 在高中能中子的作用下发生散裂反应,生成 ^{10}C 、 9O 、 8O 、 ^{13}N 、 ^{11}C 、 7Be 、 3H 等核素。除 7Be 和 3H 之外,其余皆为半衰期不超过 20 min (^{11}C 的半衰期为 20.39 min) 的核素。设备冷却水是闭路循环,因而在计算设备冷却水活化时可只计算 7Be 和 3H 的活度。

根据 PTS 系统的运行情况,推导出设备冷却水中饱和和放射性核素的浓度可按下式计算:

$$C_i = \frac{A_0 f_n f_m}{G} \cdot \frac{1 - e^{-i T_0}}{1 - e^{-i}} \cdot \frac{1 - e^{-i' t_v}}{1 - e^{-i' T}} \quad (6)$$

式中: C_i 为设备冷却水中核素 i 的浓度, Bq/cm^3 ; A_0 为进入水中的中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; t_v 为冷却水流经靶室的时间, s ; T 为冷却水循环一周的时间, s ; G 为水的密度, g/cm^3 。

PTS 系统共有 3 个设备冷却水系统, 其中的两个系统(称为 1 号和 3 号系统)处于中子辐射场中。计算结果表明, 这两个系统中的核素浓度皆很低, 1 号系统为 $30 \text{ Bq}/\text{cm}^3$, 3 号系统为 $54 \text{ Bq}/\text{cm}^3$, 主要核素是 ^3H 和 ^7Be , 其中 ^3H 约占 75%, ^7Be 约占 25%。

4 土壤(及地下水)的活化

束流损失产生的中子会穿过 PTS 系统屏蔽层而进入地下和四周(PTS 系统安置在地下)的土壤, 引起土壤(和地下水)的活化。土壤的核素成分十分复杂, 活化产生的放射性核素种类很多。根据 PTS 系统的运行方式, 推导出土壤中饱和放射性的比活度为:

$$a_i = N_i \cdot \frac{1 - e^{-i T_0}}{1 - e^{-i}} \quad (7)$$

式中: a_i 为土壤中核素 i 的比活度, Bq/g ; i 为进入土壤的中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; N_i 为生成核素 i 的母核元素在每克土壤中的原子数, g^{-1} ; i 为母核的同位素丰度。

计算结果表明, 在土壤中的活化是很微小的, 活化最大处位于加速器本体西侧的土壤中, 其活化核素的比活度仅约为 $3.8 \times 10^{-4} \text{ Bq}/\text{g}$, 主要核素是 ^3H (约占 71%), 其次是 ^7Be 、 ^{22}Na 和 ^{54}Mn 。

5 PTS 系统结构材料的活化

PTS 系统运行时产生的中子也对它自身的结构材料造成活化, 被活化的部件对 PTS 停运时的维护检修人员带来辐射照射。文献[5]报道了 1 台回旋加速器停机 12 h 后在 D 型盒切割板处的照射量率相当高, 约为 $4.13 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (即 $1.6 \text{ R} \cdot \text{h}^{-1}$); 停机 2 个月仍高达 $6.84 \times 10^{-5} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (即 $0.265 \text{ R} \cdot \text{h}^{-1}$)。此外, 损坏的部件被拆卸下来将成为固体放射性废物, 将对环境带来一定的影响。

准确计算加速器结构材料的活化是很困难的。文献[6]给出了简约估计质子加速器结构材料饱和放射性活度的方法, 即每损失 1 kW 的束流, 则产生约 $6.3 \times 10^{12} \text{ Bq}$ 的放射性核素。利用这个方法估算了 PTS 各个部位的放射性活度。所有部件全部的总活度约为 $6.8 \times 10^{11} \text{ Bq}$ 。其中最大的为能选系统, 由于该系统中束流损失流强最大, 故饱和和放射性活度约占总活度的 59%。根据各个系统的重量估算出活化部件的比活度在 $10^6 \text{ Bq}/\text{kg}$ 量级。根据文献[4]可知, 对辐射剂量起主要作用的活化核素是 ^{54}Mn 、 ^{58}V 、 ^{51}Cr 、 ^{52}Mn 和 ^{56}Mn 。

6 臭氧等有害气体的产生及排放

在光子的作用下, 空气中的氧分解生成自由基, 氧自由基与 O_2 结合生成 O_3 , O_3 与空气中的 NO 结合生成 NO_2 , NO_2 与空气中的 H_2O 结合生成 HNO_3 。其中, O_3 、 NO_2 和 HNO_3 的产额(定义为每吸收 100 eV 的光子能量产生的分子数)分别为 10、4.8 和 1.5。

根据 PTS 系统的运行工况, 可推导出每天排向环境的臭氧量按下式计算:

$$Q = FA [T + \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda T} - 1)] \quad (8)$$

$$A = 7.97 \times 10^{-17} \frac{Y E f S G}{L V} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda T_0}}{1 - e^{-\lambda}} \\ = \frac{R P}{V} + \frac{K E}{V}$$

式中: Q 为辐照区每天排向环境的臭氧量, g/d ; Y 为束流损失时产生光子的产额, s^{-1} ; E 为光子的平均能量, MeV ; f 为空气吸收光子能量的份额; S 为光子在空气中行经的平均路程, cm ; L 为光子在空气中的减弱长度, cm ; G 为 O_3 的产额; λ 为 O_3 的化学衰变常数, s^{-1} ; V 为辐照区的体积, cm^3 ; F 为辐照区的通风速率, cm^3/s ; R 为 O_3 辐照分解常数, cm^3/eV ; P 为空气吸收光子的功率, eV/s ; K 为混合不均匀系数; t 为辐照时间, s 。

根据 PTS 的系统设计及运行参数计算出 O_3 、 NO_2 和 HNO_3 的排放浓度分别为 5.7×10^{-5} 、 2.6×10^{-5} 、 $1.1 \times 10^{-5} \text{ mg}/\text{m}^3$; 排放速率分别为 0.55、0.26、0.11 mg/h ; 年排放量分别为 2.63、1.21 和 0.51 g 。

7 结论

以上分析结果表明,高能质子加速器治疗系统运行所带来的最主要的环境安全问题是质子束流损失而打在各种物质上产生的中子和射线,进而产生辐射照射、引起物质活化和产生有害气体,若处理不当将会对周围公众造成危害。这要求高能质子加速器治疗系统的设计必须具有良好的屏蔽系统、通风系统,以及防止人员误入强辐射区的安全联锁系统。

目前,中日友好医院从比利时 IBA 公司引进的 PTS 系统在这些方面是完善的,分析结果表明,它的运行对公众的安全是能得到保障的。

参考文献:

[1] Tesch K. A Simple Estimation of the Lateral Shielding for Proton Accelerators in the Energy

Range 50 to 1 000 MeV [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1985, 11(3): 165 ~ 172.

[2] Hagan WK, Colborn BL, Armstrong TW. Radiation Shielding Calculations for a 70 to 250 MeV Proton Therapy Facility [J]. Nuclear Science Engineering, 1988, 98: 272 ~ 278.

[3] Agosteo S, Corrado MG, Silari M, et al, Shielding Design for a Proton Medical Accelerator Facility [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 705 ~ 715.

[4] Patterson HW, Thomas RH. 刁会昌, 王义明, 杜德林, 等译. 加速器保健物理 [M]. 北京: 原子能出版社, 1983. 252.

[5] 陈国惠, 胡建达. 1.2 m 回旋加速器检修中的辐射防护评价 [J]. 辐射防护, 1985, 5(4): 303 ~ 307.

[6] Thomas RH, Stevenson GR. Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerator [R]. Vienna: IAEA, 1988.

(上接第 181 页, From p. 181)

3 结论

采用 LECO CS-444 红外碳硫测定仪分析了高纯钽粉中的碳。在钽粉称样量为 0.3 g 时, 加入 0.3 g 铁屑, 1.0 g 钨锡粒作助熔剂, 可使钽粉样品中的碳完全释放。本方法测定高纯钽粉试样的相对标准不确定度优于 10%, 对

标准碳标钢加入的回收率为 91% ~ 114%。

参考文献:

[1] 姚南红. HCS-040 管式炉红外碳硫分析仪测定稀土金属中碳硫 [J]. 理化检验 (化学分册), 2002, 38(5): 251 ~ 252.