

活性区更换核燃料进行卫生防疫监督时,都要严格地无条件地执行辐射安全工作规则。全面的辐射检查(其中包括个人辐射剂量测定检查),允许参加工作的人员健康状况,对允许持续工作时间的监督,使用防护装具和保证这些装具的完好等都具有特殊意义。在进行修理操作过程中,必须注意及时采取各种措施,防止放射性污染扩散,消除放射性水的泄漏,遵守修理过程中产生的放射性废料的转送规则(使用专用容器和专用塑料袋)。

除了上述舰上核燃料更换和核动力装置维修两

种放射性危险工作,更换放射性过滤器、修理核动力舰船后废料的处理(收集、存放、运输、再处理、掩埋)也属于有放射性危险的工作。

综上所述,海军人员在相关设施上进行放射性危险工作时,严格执行辐射安全规章制度,落实辐射安全卫生监督的各项措施,可以防止人员的过量受照和放射性核素形成的环境污染。

(收稿日期:2005-05-27)

文章编号:1001-098X(2005)06-0297-04

## 加速器治疗室内感生放射性研究现状

卢峰<sup>1</sup> 刘翠杰<sup>2</sup> 邓太平<sup>1</sup>

**摘要** 高能加速器缓发辐射危害不容忽视。本文对加速器治疗室内感生放射性产生的原理以及对患者、工作人员、公众等不同人群造成的危害作了综述性介绍;对加速器机头结构材料处、治疗室空气中的感生放射性水平及有关影响因素的研究现状作了较详细的讨论;最后提出了目前研究中存在的问题及对今后研究的展望。

**关键词** 感生放射性;加速器

**中图分类号** TL5, X591

**文献标识码** A

### The research status of induced radioactivity in accelerator facilities

LU Feng<sup>1</sup>, LIU Cui-jie<sup>2</sup>, DENG Da-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Radiation Medicine, Shandong Academy of Medicine Sciences, Jinan 250062, China;

2. The general hospital of Jinan Command, Jinan 250031, China)

**Abstract** The hazards of subsequent-radiation produced by high-energy accelerator must be no ignore. The principle of induced radioactivity and the hazards to the people were introduced in this article. The radiation levels around the treatment head and in the air of the treatment room were discussed thoroughly. Some effects of the induced radioactivity were also mentioned. At last, the article talks about some problems in present researches and some directions for the following study.

**Key Words** induced radioactivity; accelerator

近年来,高能加速器被越来越广泛地应用于科研和医疗领域,在给人们带来巨大裨益的同时,也给人们的工作、生活带来了潜在的放射性危害与风险。高能加速器所造成的两种放射性危害是

人们必须要考虑的:一种是瞬发辐射危害;另一种是缓发辐射危害,即感生放射性危害。瞬发辐射仅仅存在于加速器运行时,易于被人们认识并加以屏蔽;而感生放射性在加速器运行或不运行时均存在,相对于瞬发辐射而言更具有隐蔽性,其危害也不容忽视。

作者单位:1. 250062 济南,山东省医学科学院放射医学研究所;2. 250031,济南军区总医院

## 1 高能加速器治疗室内感生放射性产生的物理学基础

加速器产生的高能粒子(如质子、电子或 $\alpha$ 粒子等)轰击任何靶物质(如加速器的靶材料、遮线器、均整器、治疗室内的空气以及人体等)的原子核时,它们之间发生的核物理过程包括:入射粒子仅仅改变方向;入射粒子损失一部分能量;入射粒子完全被靶核吸收并放出其他粒子或 $\gamma$ 射线;入射粒子将靶核敲碎。在后两种过程中,靶核将变成一种新的原子核,这种反应称之为核反应,生成的新核称之为反冲核。反冲核往往是不稳定的,需要经过 $\beta$ 衰变或 $\gamma$ 衰变等才能变成稳定核。伴随衰变过程中产生的 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线等被人们称之为感生放射性。

感生放射性产生的物理学基础是核反应,惟有满足核反应条件时才会产生感生放射性。对于入射中子而言,无论其能量如何,均能够引起核反应,因为中子在原子核外是不稳定的,它总是要被其他的原子核捕获而激发核反应。但对于电子、质子等其他粒子而言,要么其能量要达到产生中子的反应阈能,通过产生的中子而激发核反应;要么其能量要足够大到引起核碎裂时才能够引起感生放射性。因此,并不是所有能量的加速器其治疗室内都存在着感生放射性。不同的入射粒子类型、不同原子序数的靶材料,核反应产生的阈能不同,加速器治疗室内产生感生放射性的最低能量也不同。一般而言,当入射粒子的能量大于50 MeV时,就有足够的能量将靶核打碎而产生感生放射性核素,因此高能加速器治疗室内相对于低能加速器治疗室更容易产生感生放射性。

## 2 高能加速器治疗室内感生放射性的危害

### 2.1 感生放射性对患者造成的危害

当高能加速器用于放射治疗时,加速器机头部位的结构材料受到高能粒子的照射而产生感生放射性。患者在接受治疗时,与机头的距离很近,必然会受到感生放射性的照射。不仅如此,高能粒子与人体治疗区域内组织器官的原子核也会发生核反应。Gudowska I等<sup>[1]</sup>用蒙特卡罗方法,对一台50兆伏回旋加速器在治疗患者时由于人体自身的感生放

射性造成的额外剂量进行了计算,结果表明,额外剂量将达到治疗剂量的0.15%左右;而由于额外剂量所导致的人体总的相对生物学效应将比传统的 $^{60}\text{Co}$ 放射治疗方式高2%左右。Strauss LG等<sup>[2]</sup>用正电子发射体层显像仪甚至检测到了使用42兆伏加速器治疗肠道肿瘤后体内产生的这种感生放射性,并试图使用这种方法来描绘治疗区域的放射性分布。此外,患者还将受到来自治疗室内空气中感生放射性的照射,这种空气中的感生放射性不仅对人体形成外照射,吸入后还将形成内照射危害。

### 2.2 感生放射性对工作人员造成的危害

在高能加速器的使用过程中,某些部件需要维修或更换,而这些部件在受到高能粒子的长期照射后,某些半衰期较长的感生放射性核素已经积累到相当浓度,必然会对维修工作人员形成照射危害。放射治疗工作中的摆位人员,他们同接受放射治疗的患者一样,将受到来自加速器机头和治疗室内空气中感生放射性的照射。Almen A等<sup>[3]</sup>用个人剂量计监测了多台加速器放射治疗工作人员躯干和手部的剂量,在约为2 mGy年剂量中,感生放射性造成的剂量贡献占到1/3(0.7 mGy)以上。有人指出,能量在1 GeV以上的加速器工作人员所受到的照射剂量中,大约有50%的剂量来自于感生放射性。同时应该注意到,工作人员一般是通过佩带个人剂量计来监测个人所受剂量的,而个人剂量计是不能用来监测内照射剂量的。因此,考虑到高能加速器在空气中形成的感生放射性核素能够被吸入而形成内照射的事实,感生放射性造成的剂量会更高。

### 2.3 感生放射性对公众造成的危害<sup>[4-7]</sup>

高能加速器治疗室内的空气受到高能粒子照射时产生的感生放射性核素(如 $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{41}\text{Ar}$ 等)、加速器本身的结构材料由于腐蚀脱落而漂浮在空气中、加速器冷却水受热蒸发进入空气中,这些都是治疗室空气中感生放射性的可能来源。空气中的感生放射性核素如果不经过适当时间的衰变就排入到周围大气环境中去,势必会对周围人群造成放射性危害。此外,高能加速器治疗室屏蔽材料中的土壤、混凝土受到照射时同样会产生感生放射性核素,当治疗室停止使用被拆除后,其地下的土壤和散落的混凝土渣可能会对周围环境造成污染。

土壤中的放射性核素甚至会伴随降水渗入到地下水、中污染水源或者通过污染区域的植物生长转移到食物中去。

### 3 高能加速器治疗室内感生放射性水平及其影响因素

只有首先了解高能加速器治疗室内的感生放射性水平,才能够对其危害进行正确评价,而感生放射性水平又与诸多因素有关。

#### 3.1 加速器机头处感生放射性水平及其影响因素

加速器机头处的感生放射性水平与加速器的能量、粒子类型、机头处的结构材料、照射时间、冷却时间等因素密切相关。Stevenson GR<sup>[8]</sup>研究表明,机头结构材料处(如加速器的靶、遮线器、均整器等)感生放射性核素的活度与高能质子在其中发生的非弹性散射(即核反应)次数有关,而核反应次数又与入射质子的能量和材料有关,并且更大程度上是依赖于入射质子的能量,不同能量之间核反应次数的差别明显大于不同材料之间的差别。但是,加速器机头处感生放射性的大小仍与靶材料密切相关,因为不同靶材料产生的感生放射性核素不同,不同放射性核素的 $\gamma$ 射线照射量率常数也不同,只有活度高、 $\gamma$ 射线照射量率常数大的感生放射性核素才会对周围有大的剂量率贡献。Yashima H等<sup>[9]</sup>对一台重离子医用加速器使用厚铜靶时产生的感生放射性进行了研究,他们使用高纯锗 $\gamma$ 能谱仪分析了不同能量条件下的感生放射性核素的种类和含量,发现在不同能量条件下,通过核碎裂反应产生的感生放射性核素的种类是不同的,并且伴随入射粒子能量的增高,感生放射性核素的含量及其造成的光子剂量率也随之增高。Ban S等<sup>[10]</sup>对一台2.5 GeV电子加速器使用铝、铁、铜、铅等厚靶材料时的多种感生放射性核素的饱和活度进行了测量:照射时间不同,光子剂量率随时间衰减的规律亦不同,一般是照射时间越长剂量率衰减越慢。Stevenson GR<sup>[11]</sup>对质子级联核反应中中子的影响进行了探讨。Weeks KJ等<sup>[12]</sup>指出,在 15~25 MeV 激发的核反应中,由于光中子反应截面约为电中子反应截面的 100 倍,通过光中子反应产生的放射性核素含量要明显高于电中子反应。Ewen K 等<sup>[13]</sup>测量了一台 SL 75/20 型医用电子加速器在 16 MeV 能量下运行

15min 后在出线口处、治疗床平面等位置处的感生放射性水平,他们指出,在这些位置处, $\beta$ 射线也会形成对人体的照射危害。

#### 3.2 加速器治疗室空气中的感生放射性水平及其影响因素

治疗室空气中感生放射性核素主要来自于高能粒子与空气中 C、O、N、Ar 等元素的核反应。Endo A 等<sup>[14]</sup>的研究表明,98%以上的放射性活度均来自于气态的感生放射性核素,来自于灰尘颗粒或者气溶胶形式的放射性活度小于 2%;与机头处感生放射性影响因素一样,空气中的感生放射性水平必然与高能粒子的能量、类型有关;另外,由于感生放射性核素的气态形式,其放射性水平还与治疗室内的温度、湿度和通风状况有关。由于治疗室内一般保持相对恒定的温度和湿度,因此人们较为关心的是通风状况对感生放射性的影响。Agosteo S<sup>[15]</sup>以 250 MeV 质子加速器为例,详细介绍了治疗室内气体感生放射性水平的计算方法,估算了感生放射性气体被排出治疗室后对周围人群造成的剂量率水平。国际放射防护委员会第 144 号出版物<sup>[16]</sup>中分别介绍了光子、热中子、高能中子通过核反应产生感生放射性核素的计算公式,并指出气溶胶或灰尘颗粒形态的感生放射性核素造成的剂量率贡献可忽略不计。Stevenson GR<sup>[8]</sup>则使用层流模型和混合模型讨论了如何计算通风口处的感生放射性水平。Endo A 等<sup>[14]</sup>研究了 100 MeV 电子加速器治疗室内  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  等感生放射性核素存在的分子形式,通过使用滤膜空气采样装置和气流电离室测定了各种核素的放射性活度,并对它们形成的内照射剂量进行了估算。

### 4 问题与展望<sup>[16]</sup>

目前,人们对于加速器机头结构材料处和治疗室空气中的感生放射性研究相对较为成熟。常见的计算方法是根据核反应原理,通过入射粒子与靶物质材料之间相互作用的反应截面、粒子在物质中穿行的路径长度等参数计算感生放射性核素的活度,然后在一定的假设前提下(如假设感生放射性核素都集中在某一点上、忽略自吸收等),根据每一种核素的 $\gamma$ 射线照射量率常数再估算出某点的光子剂量率,以此来推断对人体的危害。现在已经有了一系列的蒙特卡罗计算机模拟程序,如 MCNPX、

FLUKA 等代替人工进行计算。以上方法的缺陷是,即使是使用最现代化的计算机,上述计算仍旧是费时费力的;在某些方面,尚缺乏进行模拟计算所需的足够的资料数据;另外,模拟计算的结果与实际测量结果之间的误差有时候可能会超出人们可以接受的水平。进一步的研究是必须的,在计算误差允许的范围内,某些特定情况下的经验公式有时可能会更方便、更快捷地解决问题。

除了在估算感生放射性水平的过程中尚存在一些问题,在某些方面也缺乏更为详尽的研究资料和更为成熟的研究方法,如空气中感生放射性核素被吸入人体后形成的内照射,机房混凝土墙、地下土壤中的感生放射性核素对周围环境造成污染的分析与评价,加速器冷却水中感生放射性水平及影响因素等。

#### 参 考 文 献

- 1 Gudowska I, Brahme A, Andreo P, et al. Calculation of absorbed dose and biological effectiveness from photonuclear reactions in a bremsstrahlung beam of end point 50 MeV[J]. *Phys Med Biol*, 1999, 44(9): 2099-2125.
- 2 Strauss LG, Clorius JH, Kimmig B, et al. Imaging positron emitting radionuclides generated during radiation therapy[J]. *Eur J Radiol*, 1989, 9(4): 200-202.
- 3 Almen A, Ahlgren L, Mattsson S. Absorbed dose to technicians due to induced activity in linear accelerators for radiation therapy[J]. *Phys Med Biol*, 1991, 36(6): 815-822.
- 4 Endo A, Harada Y, Kawasaki K, et al. Measurement of depth distributions of (3)H and (14)C induced in concrete shielding of an electron accelerator facility[J]. *Appl Radiat Isot*, 2004, 60(6): 955-958.
- 5 Marco S, Luisa U. Investigation of induced radioactivity in the CERN large electron positron collider for its decommissioning[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 2004, 526(3): 510-536.
- 6 Robert C, Donald C, Keran O, et al. Environmental Radiological Aspects of Particle Accelerators[J]. *NCRP Report*, 2003, 144: 320-359.
- 7 Rokni SH, Fasso A, Gwise T, et al. Induced radioactivity of materials by stray radiation fields at an electron accelerator[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 2002, 484(1-3): 680-689.
- 8 Stevenson GR. Induced activity in accelerator structures, air and water[J]. *Radiat Prot Dos*, 2001, 96(4): 373-380.
- 9 Yashima H, Uwamino Y, Sugita H, et al. Induced radioactivity in Cu targets produced by high-energy heavy ions and the corresponding estimated photon dose rates[J]. *Radiat Prot Dos*, 2004, 112(2): 195-208.
- 10 Ban S, Nakamura H, Sato T, et al. Radioactivity induced in a 2.5 Ge V electron beam dump[J]. *Radiat Prot Dos*, 2001, 93(3): 231-236.
- 11 Stevenson GR. Experimental verification of particle distributions in proton-induced cascades[J]. *Adv Space Res*, 1996, 17(2): 95-104.
- 12 Weeks KJ, O'Shea PG. Production of radioisotopes by direct electron activation[J]. *Med Phys*, 1998, 25(4): 488-492.
- 13 Ewen K, Lauber-Altmann I. Activation of solid materials in a medical linear electron accelerator[J]. *Rontgenblatter*, 1987, 40(6): 185-190.
- 14 Endo A, Kikuchi M, Izawa S, et al. Characteristics of the chemical from of 11C, 13N, and 15O induced in air by the operation of a 100 MeV electron linear accelerator[J]. *Health Phys*, 1995, 68(1): 80-88.
- 15 Agosteo S. Radiation protection at medical accelerators[J]. *Radiat Prot Dos*, 2001, 96(4): 393-406.
- 16 Silari M. Special radiation protection aspects of medical accelerators[J]. *Radiat Prot Dos*, 2001, 96(4): 381-392.

(收稿日期: 2005-02-03)

#### 本刊协作办刊单位 (按字顺笔划为序):

天津市协和医药科技有限公司  
天津市第一中心医院  
天津市康赛生物技术有限公司  
中山大学第二附属医院  
北京大学第一医院  
四川省泸州医学院附属医院  
军事医学科学院放射医学研究所

佛山市第一人民医院  
苏州大学附二院  
河北医科大学第二医院  
南京市临床核医学中心  
首都医科大学朝阳医院  
复旦大学放射医学研究所  
海南省人民医院