

# 正电子发射扫描仪和回旋加速器装置环境影响评价

于 水 顾洪坤<sup>1</sup> 吴松恒<sup>2</sup> 章文英<sup>1</sup> 赵 法<sup>2</sup> 王功鹏

(军事医学科学院放射医学研究所, 北京 100850)

中图分类号: R145; X591 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2000)01-004-02

**摘要:** 本文以 CII 公司生产的 RDS 111 型回旋加速器和配套的 PET 装置为例, 依据其放射性源项特点, 评价了该装置正常和非正常运行状况下对环境的影响。

**关键词:** PET; 回旋加速器; 环境影响评价

**Environmental impact assessment for the apparatus of positron emission tomograph and cyclotron. Yu shui et al (Institute of Radiation medicine, Beijing)**

**Abstract:** In this paper, cyclotron, type RDS 111, produced by CII incorporation, was used as an exemple. According to the characteristic of the radiation source term, the environmental impacts of the apparatus working in normal and abnormal conditions were assessed.

**Key words:** PET; Cyclotron; Environmental impact assessment

## 1 引言

正电子发射扫描成像仪 (PET) 是目前最先进的核医学影像诊断设备之一, 可用于心、脑、肿瘤等疾病的早期诊断, 可研究重要生命物质如糖、蛋白质、脂肪等在人体内的功能与代谢过程, 有巨大的应用前景。目前全世界有 200 多台 PET, 3~5 年内我国可望有 5~10 台 PET 运转。杨国山等<sup>[1]</sup> 曾对 PET 及其配套回旋加速器的辐射源项和照射途径进行了分析, 提出了防护与屏蔽的建议。本文以美国 CII 公司生产的 RDS 111 型回旋加速器和配套的装置为例, 依据诊断过程中放射性源项特点, 介绍了该装置正常和非正常运行状况下对环境的影响。

## 2 RDS 111 型回旋加速器及其配套装置的特点

加速质子能量最大为 11MeV, 束流 30~40 $\mu$ A, 加速器室尺寸 701 $\times$ 670 $\times$ 427cm, 靶点在中心左前侧 280cm $\times$ 290cm $\times$ 109cm 处。可生产<sup>18</sup>F、<sup>13</sup>N、<sup>11</sup>C、<sup>15</sup>O 几种放射性核素。化学合成系统能够在计算机控制下自动完成放射性药物的制备。内有带高效过滤器的通风系统。

加速器带自屏蔽装置。自屏蔽体由内、外两层组成, 内层为 30cm 厚铅、环氧树脂和碳化硼混合的高密度铸件, 用于慢化快中子, 吸收热中子; 外层为 70cm 厚含聚乙烯和碳化硼的混凝土, 用于慢化和吸收中子, 降低次级 $\gamma$ 辐射。

加速器有完整的安全联锁系统, 只有当靶、离子源、磁铁线圈等有冷却水并达到一定流速时, 束流才能打到靶上。只有当自屏蔽体封闭、离子源射频屏蔽箱盖关上才能出束。只有在加速器防护门关闭时, 才能启动加速器。只有当加速器室内的剂量值小于限值时, 才能打开加速器室防护门。

## 3 评价采用的限值和建设项目中放射性场所模型 (见图 1)

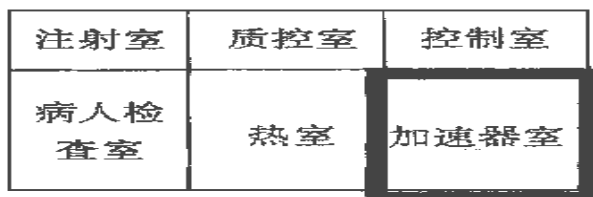


图 1 建设项目中放射性场所示意图

职业照射和公众照射限值采用 ICRP 60 号报告<sup>[2]</sup> 建议值。

1 北京市环境保护科学研究院 2 军事医学科学院仪器分析中心

作者简介: 于水 (1965~), 男, 汉族, 内蒙古人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向: 辐射监测与防护

本着为将来发展留有余地的原则, 对公众照射的剂量分配值为 30 $\mu$ Sv。气载放射性核素的环境限值为《辐射防护规定》<sup>[3]</sup> 中气载放射性核素导出空气浓度 (DAC) 的 1/150。

## 4 环境放射性污染源项分析

环境放射性污染源项主要有贯穿辐射 (中子和 $\gamma$ 射线), 活化气体和放射性“三废”。

4.1 中子 中子可通过<sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F 和<sup>15</sup>N(p,n)<sup>15</sup>O 反应而产生, 最大能量约 8.5MeV, 中子发射率  $1.2 \times 10^{11}$  n/s (束流 20 $\mu$ A, 靶厚 2mm, <sup>18</sup>O 丰度 85%), 90° 方向中子注量率与 $\theta$  方向之比为 0.1。加速器室屏蔽墙内侧中子剂量当量率为 4 $\mu$ Sv/h, 能量 5MeV。

4.2  $\gamma$  射线  $\gamma$  射线主要有以下几种来源: (1) 中子与自屏蔽体、靶周围物质等部件作用产生次级 $\gamma$ 射线, 在加速器屏蔽墙内侧 $\gamma$ 射线平均能量为 8MeV, 剂量当量率为 16 $\mu$ Sv/h。 (2) 加速器部件、靶周围器件、准直器、自屏蔽体等受中子照射而活化, 生成以短半衰期为主的感生放射性。 (3) 在加速器打靶时, 由<sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F 反应产生发射正电子的核素<sup>18</sup>F。<sup>18</sup>F 的 $\beta^+$ 衰变经湮没后发射出能量为 0.511MeV 的 $\gamma$ 射线。

4.3 活化气体 加速器室中的空气受中子照射后可生成放射性活化气体, 主要核素有<sup>11</sup>C、<sup>15</sup>O、<sup>13</sup>N 和<sup>41</sup>Ar 等, 其中关键核素为<sup>41</sup>Ar。它们经高效过滤器净化后, 排放到环境中。

4.4 气载放射性物质 在放射性药物制取、质检、分装、注射时, 部分未被高效过滤器净化的含<sup>18</sup>F 等的放射性气体经通风管道排入大气, 会对环境产生污染。

4.5 放射性废物 包括乙腈反应介质和乙醚洗涤液、靶冷却水、少量剩余药液、受检病人的尿液、废靶料以及一些其他固体废物, 其中主要核素为<sup>18</sup>F、<sup>13</sup>N。

## 5 正常运行情况下对环境的影响

### 5.1 加速器的贯穿辐射

依据设备参数, 采用文献<sup>[1]</sup> 提供的公式, 按加速器全年开机 1000h, 计算得出了加速器屏蔽墙外剂量当量率和工作人员受照年剂量当量。如表 1 所示。可见, 控制室和热室工作人员

表 1 加速器屏蔽墙外剂量当量率和人员受照年剂量当量

位置	距离 (cm)	壁厚 (cm)	剂量 当量率 ( $\mu$ Sv/h)	居留 因子	年剂量 当量 ( $\mu$ Sv)
加速器室/外墙	439	50	0.44	1/16	27.50
加速器室/控制室	420	50	0.48	1	480
加速器室/热室	439	50	0.44	1	440
加速器室/顶棚	266	50	0.12	1/16	7.5

员因贯穿辐射所致年剂量当量小于 0.5mSv, 加速器上部和外

面公众因贯穿辐射所致年剂量当量分别为 7.5 $\mu$ Sv 和 27.5 $\mu$ Sv。

5.2 活化气体

加速器运行时,大厅中的空气被中子活化可产生活化气体。半衰期小于 1min 的放射性核素,通过通风系统进入环境中,很快衰变到可忽略的水平。而一些较长半衰期的核素,如<sup>15</sup>O、<sup>13</sup>N、<sup>11</sup>C 和<sup>41</sup>Ar 的产生率相当低,需要考虑的关键核素是<sup>41</sup>Ar。<sup>41</sup>Ar 通过<sup>40</sup>Ar(n,  $\gamma$ )<sup>41</sup>Ar 核反应产生,中子在入射到自屏蔽体前只与 0.276 m<sup>3</sup> 的空气发生作用,其中可以生成<sup>41</sup>Ar 的<sup>40</sup>Ar 只占该空气体积的 1.3%,即 0.0035 m<sup>3</sup>。文献<sup>[1]</sup>估算得出中子的发射率为 1.18 $\times 10^{11}$  n/s 据此计算与<sup>41</sup>Ar 作用产生的活化气体的核数不会超过 4.1 $\times 10^8$ 核/s。假设半衰期为 10min,锥体体积为 1 m<sup>3</sup>,换气率 10h<sup>-1</sup>,则活化气体浓度不会大于 0.1GBq/m<sup>3</sup>。

5.3 放射性药物的贯穿辐射(以生产<sup>18</sup>F 药物为例)

在生产<sup>18</sup>F 药物过程中,<sup>18</sup>F 的 $\beta$ 衰变经电子对湮没产生能量为 0.511MeV 的 $\gamma$ 辐射。各放射性同位素操作室 $\gamma$ 辐射

表 2 放射性操作间屏蔽墙外剂量当量率及人员受照剂量当量

位置	A (GBq)	R (m)	铅		砼		剂量当量 率(nSv/h)	居留 因子	年剂量当量 ( $\mu$ Sv)
			X(cm)	k	X(cm)	k			
热室/外墙	37	3.5	6	1 $\times 10^{-4}$	25	10	4.08	1/16	0.26
热室/顶棚	37	3	6	1 $\times 10^{-4}$	30	20	2.77	1/16	0.17
质检室/热室	14	0.5	6	1 $\times 10^{-4}$	20	5	150	1	150

注:假定加速器每年工作 1000h

表 3 操作人员年剂量当量

不同种类操作人员	年剂量当量(mSv)
热室	2.75
质检室	1.04
注射室	0.28

注:假设工作人员距源 30cm,一年工作 500h

可见,在制备和使用放射性药物时,工作人员接受的年剂量当量最大为 2.8mSv。由于放射性药物生产是全自动的,工作人员的全年操作时间远小于 500h。同时,在所有计算中没有考虑操作过程中放射性同位素的衰变,所以预计工作人员受照剂量会更低。

5.4 气载放射性物质

以生产<sup>18</sup>F 为例,热室工作箱一次最大操作量 37GBq(1Ci),完成一次操作大约需要 1h,假设<sup>18</sup>F 在操作过程中产生有 10%<sup>18</sup>F(3.7GBq)气载放射性物质,计入 0.1GBq 活化气体,经高效过滤(过滤效率以 99%计)后,有约 38MBq 在 1h 内排入大气。假设风机通风能力为 1500m<sup>3</sup>/h,则排气口<sup>18</sup>F 的释放率为 1.03 $\times 10^4$ Bq/s(排气口内径 50cm)。

依照大气环境影响评价技术导则<sup>[4]</sup>,采用连续点源烟羽扩散模式,计算得出不同稳定性和不同风速情况下,排气筒下风向一次(30min)取样时间的最大地面浓度介于 0.60~3.77Bq/m<sup>3</sup>之间,均低于《辐射防护规定》<sup>[3]</sup>中气载放射性核素导出空气浓度(DAC)的 1/150。采用最大地面浓度 3.8Bq/m<sup>3</sup>来计算周围公众的受照剂量。根据外照射剂量转换因子 3.6 $\times 10^{-4}$ ( $\mu$ Sv/h)/

点源<sup>18</sup>F 每次操作量为:热室工作箱 37GBq(1Ci);质检室通风柜中 14GBq(375mCi);注射室 0.37GBq(10mCi)。放射性药物制备工作箱是密闭的,热室工作箱和质检室通风柜用 6cm 铅屏蔽,注射室用 4.34cm 铅屏蔽。

$\gamma$ 射线剂量率可由点源公式(1)计算

$$H = \frac{1}{2.58 \times 10^{-4}} \times \frac{A}{R^2} \times \frac{k_1}{k} \times \Gamma \times Q \quad (1)$$

式中:H—剂量当量率,(Sv/h);A—源活度(Bq); $\Gamma$ —照射量率常数,对<sup>18</sup>F, $\Gamma=0.4 \times 10^{-14}$ C $\cdot$ m<sup>2</sup>/h $\cdot$ kg $\cdot$ Bq;R—计算点距源距离(m);k—屏蔽减弱倍数;k<sub>1</sub>—伦琴与戈瑞转换系数,0.869 $\times 10^{-2}$ ;Q—品质因子,1;2.58 $\times 10^{-4}$ —库仑/千克与伦琴转换系数;

热室、质检室等操作间屏蔽墙外的剂量当量率及工作人员受照年剂量当量列于表 2。在热室、质控室和注射室进行不同操作人员的年剂量当量列于表 3。

(Bq/m<sup>-3</sup>),假设每年工作 250 天,每天 4h,全年开机 1000h,则受照剂量为 1.4 $\mu$ Sv/a。考虑加速器的贯穿辐射,公众受照剂量低于剂量约束目标值 30 $\mu$ Sv/a。

6 非正常情况下对环境影响

6.1 熔靶和靶水吸附事故 以一次生产 37GBq<sup>18</sup>F 考虑,经 24h(13 个半衰期)衰变后为 9.0MBq。此时,30cm 远处的 $\gamma$ 剂量当量率为 13.4 $\mu$ Sv/h。所以当发生此种事故时,可封闭加速器大厅 24h 利用半衰期短的特点,经自然衰变后,再进行处理,可减少对环境的影响。

6.2 反应器倾翻和破裂事故 停止通风,防止<sup>18</sup>F 扩散,让其在气密性的工作箱内自然衰变,24h 后便可正常工作。

6.3 高效过滤器失效 假设高效过滤器失效,最大地面浓度可高出正常值 100 倍,仍然小于限值。由于发生这种情况是短时间的,公众年受照剂量几乎不受影响。

6.4 自然灾害 立即切断电源,加速器停机。迅速将放射性物质和气瓶移至安全地区,如果靶料、放射性同位素和放射性药物泼散、泄漏,应确定污染范围,禁止人员进入,封闭 24h。

参考文献:

[1] 杨国山,蔡反政,薛永库,等.正电子发射扫描仪和回旋加速器建设中的防护评价[J].中国辐射卫生,1999,8(1):21  
[2] ICRP.国际放射防护委员会 1990 年建议书[R].(李德平等译),北京:原子能出版社,1993  
[3] GB8703-88.辐射防护规定[S].  
[4] HJ/T2 2-93.大气环境影响评价技术导则[S].

收稿日期:1999-08-01