

## 用 $^{137}\text{Cs}$ 放射源替代 $^{18}\text{F}$ 检验 PET 专用工作箱屏蔽效果的换算公式

梁石强<sup>1</sup>, 李慧娟<sup>2</sup>, 于 涛<sup>1</sup>

(1. 中国原子能科学研究院 同位素研究所, 北京 102413; 2. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013)

**摘要:** 为了检验 PET 专用工作箱对 $^{18}\text{F}$   $\gamma$ 射线的屏蔽效果, 采用  $\gamma$ 点源吸收剂量率的计算公式, 并以 $^{137}\text{Cs}$  替代 $^{18}\text{F}$ , 推导出一个换算公式。依据此计算公式, 只需测量 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 点源在参考点处的吸收剂量率, 便可由换算公式计算出 $^{18}\text{F}$ 在参考点相应活度的吸收剂量率。这些吸收剂量率为评价 PET 专用工作箱对 $^{18}\text{F}$ 的屏蔽效果提供了可靠数据。用此换算公式计算某医院正在使用的 PET 专用工作箱中 $^{18}\text{F}$ 参考点处的吸收剂量率, 并与现场检测结果比较, 结果显示, 两种方法所得结果基本一致。说明用 $^{137}\text{Cs}$ 放射源替代 $^{18}\text{F}$ 检验 PET 专用工作箱的屏蔽效果是可行的。

**关键词:** PET 专用工作箱;  $\gamma$ 点源; 屏蔽效果; 换算公式

**中图分类号:** TL752.2; TL77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7512(2007)01-0125-04

## The Conversion Formula on Examining Shielding Effect of the PET Special Box Using $^{137}\text{Cs}$ Source as a Substitute for $^{18}\text{F}$

LIANG Shi-qiang<sup>1</sup>, LI Hui-juan<sup>2</sup>, YU Tao<sup>1</sup>

(1. Department of Isotopes, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Beijing Municipal Center for Hygiene and Epidemic Control Beijing 10013, China)

**Abstract:** In order to test the  $\gamma$  shielding effect of PET special working-boxes to  $^{18}\text{F}$ , the conversion formula using calculate formula of  $\gamma$  point-source absorbed dose rate and substitute  $^{137}\text{Cs}$  for  $^{18}\text{F}$  is deduced. Only the absorbed dose rate of  $^{137}\text{Cs}$  sealed source is measured at the reference point, the absorbed dose rate of  $^{18}\text{F}$  can also be calculated at the same preference point according to the conversion formula. The shielding effect of PET special working-boxes to  $^{18}\text{F}$  can be evaluated by means of these calculated data. These calculate data using this conversion formula is basically accordant with the measured data at site.

**Key words:** PET special box;  $\gamma$  point source; shielding effect; conversion formula

$^{18}\text{F}$  由于具有寿命短(半衰期为 109.70 min)、毒性低(属放射性低毒组核素)、 $\beta^+$ 衰变( $\beta^+$ 湮产生两条能量为 0.511 MeV 的  $\gamma$ 射线)等特点, 已被广泛应用于医学领域<sup>[1,2]</sup>。利用 $^{18}\text{F}$

核素合成的药物( $^{18}\text{F}$  FDG)可进行正电子发射断层成像(PET)诊断癌症等疾病<sup>[3~6]</sup>。制备 $^{18}\text{F}$ 合成药物必须在有屏蔽  $\gamma$ 射线的 PET 专用工作箱中进行。PET 专用工作箱的辐射安全性能应符合

合有关国家标准和行业标准的规定和要求<sup>[7~9]</sup>, 其中对  $\gamma$  射线的屏蔽性能是一项重要的指标。文献<sup>[9]</sup>中指出, 屏蔽性能应在投产前和运行后分别采用计算和实际测量方法进行全面检验并做出评价。经验表明, 辐射防护问题在投产前的检验中发现, 有利于修改和补救, 因为这时尚未操作放射性物质, 没有放射性物质污染, 投产后的检验主要是进行辐射安全评价。

检验屏蔽体的屏蔽性能, 必须利用  $\gamma$  放射源和与之适应的测量仪表。由于  $^{18}\text{F}$  的半衰期仅 109.70 min, 在检验时间内, 因  $^{18}\text{F}$  衰变使其活度减少而导致参考点处  $\gamma$  射线的吸收剂量率随之下降, 给准确检验测量带来困难; 加之  $^{18}\text{F}$  合成药物又相当昂贵, 所以不宜直接用它作为  $\gamma$  源检验 PET 专用工作箱的屏蔽性能。为此, 本工作拟推导一个换算公式, 采用半衰期较长,  $\gamma$  射线能量较接近, 且生产成本远低于  $^{18}\text{F}$  的  $^{137}\text{Cs}$  (半衰期 30 a,  $\gamma$  射线能量为 0.662 MeV)  $\gamma$  密封放射源作为  $\gamma$  点源, 替代  $^{18}\text{F}$  检验 PET 专用工作箱的屏蔽性能, 以克服  $^{18}\text{F}$  活度衰减给准确检测带来的困难; 同时, 还希望能解决 (即使  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{18}\text{F}$  的活度相同, 测量条件相同) 因  $\gamma$  射线能量不同而导致参考点的吸收剂量率的差异问题。

## 1 理论依据与条件

### 1.1 理论依据

(1) 依据文献<sup>[10]</sup>附录 8 给出的不同光子能量 (MeV) 与单位光子注量率的剂量当量率 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} / \gamma \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的换算系数, 取  $\gamma$  射线能量为 0.06~2 MeV 时相应的换算系数作图, 结果示于图 1。从图 1 可看出, 对常见的  $\gamma$  放射性核素, 其  $\gamma$  射线能量为 0.06~2 MeV 的单位  $\gamma$  注量率的吸收剂量率与  $\gamma$  射线能量的关系基本呈线性 (拟合直线表达式为  $Y = 7.87 \times 10^{-4} + 0.0157 X$ , 拟合系数为 0.994)。

(2) 换算公式是依据  $\gamma$  点源在参考点的吸收剂量率计算公式推导而来, 因此, 检验必须满足点源条件。

(3) 在相同条件下, 参考点的吸收剂量率与  $\gamma$  点源活度成正比。

### 1.2 条件

应用换算公式必须满足以下 5 个条件。

(1) PET 专用工作箱屏蔽体的屏蔽材料与厚度应已知, 参考点与  $\gamma$  点源之间的距离应与

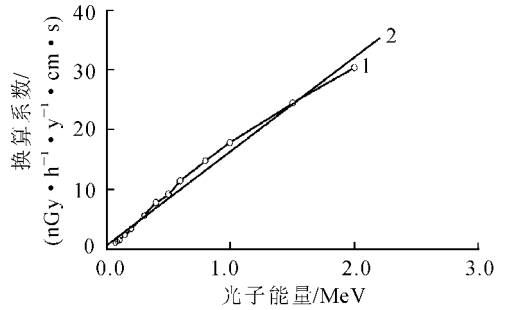


图 1  $\gamma$  射线的换算系数与能量的关系  
1——文献<sup>[10]</sup>的部分数据; 2——拟合直线

备  $^{18}\text{F}$  合成药物时一致。

(2) 合理确定制备  $^{18}\text{F}$  合成药物时  $^{18}\text{F}$  核素的中心点, 作为放置  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  点源的位置。

(3)  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  点的源活度, 不但应满足其  $\gamma$  射线通过 PET 专用工作箱屏蔽层后在参考点的吸收剂量率应大于辐射防护测量仪表的探测下限 3 倍以上, 而且此活度值应由法定检验部门标定。

(4) 选用除  $^{137}\text{Cs}$  外其他核素替代  $^{18}\text{F}$  (或另一种核素) 作  $\gamma$  点源, 其  $\gamma$  射线能量应尽可能接近 0.511 MeV (或另一种核素  $\gamma$  射线的能量)。

(5) 换算公式忽略了空气吸收对参考点吸收剂量率的影响 (在检测条件下, 无论是  $^{18}\text{F}$  还是  $^{137}\text{Cs}$  的空气吸收对参考点的吸收剂量率都有影响, 计算表明, 因  $^{18}\text{F}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的  $\gamma$  射线能量的差异而导致在参考点处吸收剂量率影响的差别小于 0.1%, 故可以忽略)。

## 2 换算公式

依据  $\gamma$  点源吸收剂量率的计算公式, 当已知活度为  $A_{\text{Cs}}$  (Bq) 的  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  点源置于 PET 专用工作箱内给定位置时, 在箱外参考点处的吸收剂量率  $\dot{D}_{\text{Cs}, \text{参}}$  ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 的计算公式为 (1) 式:

$$\dot{D}_{\text{Cs}, \text{参}} = \frac{A_{\text{Cs}} \Gamma_{\text{Cs}} \cdot f}{R^2} \cdot B_{\text{Cs}, \text{d}} \cdot e^{-\mu_{\text{Cs}} d} \quad (1)$$

利用减弱倍数方法,  $\dot{D}_{\text{Cs}, \text{参}}$  又可写为 (2) 式:

$$\dot{D}_{\text{Cs}, \text{参}} = \frac{A_{\text{Cs}} \Gamma_{\text{Cs}} \cdot f}{R^2} \cdot \frac{1}{K_{\text{Cs}}} \quad (2)$$

同理, 当活度为  $A_{\text{F}}$  (Bq) 的  $^{18}\text{F}$  置于与  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  点源相同位置时, 在参考点处的吸收剂量率  $\dot{D}_{\text{F}, \text{参}}$  ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 的计算公式为 (3) 式或 (4) 式:

$$\dot{D}_{\text{F}, \text{参}} = \frac{A_{\text{F}} \Gamma_{\text{F}} \cdot f}{R^2} \cdot B_{\text{F}, \text{d}} \cdot e^{-\mu_{\text{F}} d} \quad (3)$$

$$\dot{D}_{F \cdot \text{参}} = \frac{A_F \Gamma_F \cdot f}{R^2} \cdot \frac{1}{K_F} \quad (4)$$

(1)~(4)式中: $\Gamma_{Cs}$ 和 $\Gamma_F$ 分别为<sup>137</sup>Cs和<sup>18</sup>F的照射率常数, $C \cdot m^2 \cdot kg^{-1} \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ;R为参考点至<sup>137</sup>Cs或<sup>18</sup>F点源之间的距离,m; $f$ 为照射量率与吸收剂量率单位之间的换算系数, $J \cdot C^{-1}$ ;  $B_{Cs \cdot d}$ 和 $B_{F \cdot d}$ 为当PET专用工作箱的屏蔽体材料和厚度 $d$ (cm)都给定时,<sup>137</sup>Cs和<sup>18</sup>F源的 $\gamma$ 射线在参考点处的累积因子; $\mu_{Cs}$ 和 $\mu_F$ 为PET专用工作箱的屏蔽体材料对<sup>137</sup>Cs核素和<sup>18</sup>F核素 $\gamma$ 射线相应的线性吸收系数, $cm^{-1}$ ;  $K_{Cs}$ 和 $K_F$ 分别为PET专用工作箱的屏蔽体材料与厚度( $d$ )以及参考点距 $\gamma$ 点源的距离( $R$ )都给定时,对<sup>137</sup>Cs和<sup>18</sup>F宽束 $\gamma$ 射线的减弱倍数(采用宽束半值层可以忽略累积因子 $B$ 的影响)。

令 $\dot{D}_{F \cdot \text{参}} = \dot{D}_{Cs \cdot \text{参}}$ ,则<sup>18</sup>F的活度 $A_F$ 可由(5)式或(6)式计算:

$$A_F = A_{Cs} \cdot \frac{\Gamma_{Cs}}{\Gamma_F} \cdot \frac{B_{Cs \cdot d}}{B_{F \cdot d}} \cdot \frac{e^{-\mu_{Cs} \cdot d}}{e^{-\mu_F \cdot d}} \quad (5)$$

$$A_F = A_{Cs} \cdot \frac{\Gamma_{Cs}}{\Gamma_F} \cdot \frac{B_{Cs \cdot d}}{B_{F \cdot d}} \cdot \frac{K_F}{K_{Cs}} \quad (6)$$

采用公式(6)计算 $A_F$ 比公式(5)简易些。 $A_{Cs}$ 已知, $\Gamma_{Cs}$ 和 $\Gamma_F$ 可以从文献[2]中查表得到。只需计算 $K_{Cs}$ 和 $K_F$ 。PET专用工作箱加工完毕时,其屏蔽材料与厚度( $d$ )以及参考点与 $\gamma$ 点源之间的距离( $R$ )已确定, $K_{Cs}$ 和 $K_F$ 可以利用 $\frac{d}{\Delta \cdot \frac{1}{2}} = n$ 和 $k = 2^n$ 计算得到,则 $A_F$ 即可计算得到。

北京魏利斯米勒辐射防护设备有限公司的HWMBJ-PET-SD1型和HWMBJ-PET-SD2型(设计<sup>18</sup>F活度最大操作量为55.5 GBq)PET专用工作箱的屏蔽体厚度是铅7 cm和铁1 cm,从文献[11]中查表(或插入法)得到<sup>137</sup>Cs宽束 $\gamma$ 射线的半值层为0.70 cm(对铅)和1.8 cm(对铁),<sup>18</sup>F宽束 $\gamma$ 射线的半值层为0.57 cm(对铅)和1.61 cm(对铁),则 $K_{Cs} = 1\ 505$ 和 $K_F = 8\ 096$ ;再从文献[2]中查得表到 $\Gamma_{Cs}$ 为 $6.312 \times 10^{-19} C \cdot kg^{-1} \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ 和 $\Gamma_F$ 为 $1.109 \times 10^{-18} C \cdot kg^{-1} \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ,这样,(6)式可简化为(7)式:

$$A_F = 3.06 A_{Cs} \quad (7)$$

依据吸收剂量率与 $\gamma$ 点源活度成正比的关系,再计算出在PET专用工作箱中操作<sup>18</sup>F活度达最大操作量 $A_{F \cdot \text{大}}$ 时,参考点处相对的吸收剂

量率, $\dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{大}} (\mu Gy \cdot h^{-1})$ :

$$\dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{大}} = \dot{D}_{F \cdot \text{参}} \frac{A_{F \cdot \text{大}}}{A_F} \quad (8)$$

将(6)式代入(8)式又得:

$$\dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{大}} = \dot{D}_{F \cdot \text{参}} \cdot A_{F \cdot \text{大}} / (A_{Cs} \cdot \frac{\Gamma_{Cs}}{\Gamma_F} \cdot \frac{K_F}{K_{Cs}})$$

因为 $\dot{D}_{Cs \cdot \text{参}} = \dot{D}_{F \cdot \text{参}}$ ,则:

$$\dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{大}} = \dot{D}_{Cs \cdot \text{参}} \cdot \frac{A_{F \cdot \text{大}}}{A_{Cs}} \cdot \frac{\Gamma_{F \cdot \text{大}}}{\Gamma_{Cs}} \cdot \frac{K_{Cs}}{K_F} \quad (9)$$

(9)式即为利用<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 点源(或替代源)替代<sup>18</sup>F(或另一种核素)检验PET专用工作箱屏蔽体屏蔽效果的(通用)换算公式。利用此公式只需测量<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 点源的 $\gamma$ 射线通过PET专用工作箱屏蔽层在参考点处的吸收剂量率,便可以计算出<sup>18</sup>F活度达最大操作量时,参考点处的吸收剂量率。

利用上述给出的PET专用工作箱等参数,将(7)式代入(8)式,则(8)式可转化为(10)式:

$$\dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{大}} = 0.327 \frac{A_{F \cdot \text{大}}}{A_{Cs}} \cdot \dot{D}_{Cs \cdot \text{参}} \quad (10)$$

(10)式即为用<sup>137</sup>Cs放射源替代<sup>18</sup>F检测HWMBJ-PFT-SD1型等工作箱时,换算为<sup>18</sup>F活度达最大操作量时的换算公式。

将 $\dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{大}}$ 与设计PET专用工作箱屏蔽体时在参考点处的吸收剂量率的控制限值 $\dot{D}_{F \cdot \text{大} \cdot \text{控}} (\mu Gy \cdot h^{-1})$ 比较,作为评价PET专用工作箱屏蔽效果的依据,应满足(11)式:

$$\dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{大}} \leq \dot{D}_{F \cdot \text{参} \cdot \text{控}} \quad (11)$$

### 3 现场检测结果

利用<sup>18</sup>F对在天津某医院的HWMBJ-PET-SD1型和SDI型PET专用工作箱中合成<sup>18</sup>F药物的操作过程进行检测,结果列于表1。为了比较,表1中还列出了在中国原子能科学研究院采用4.63 GBq(~125 mCi)<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 密封放射源替代<sup>18</sup>F对HWMBJ-PET-SD1型和SD2型PET专用工作箱加工后投产前的屏蔽效果的检测结果,和利用换算公式计算到<sup>18</sup>F活度为55.5、13.0和10.4 GBq时相应参考点的吸收剂量率。因<sup>18</sup>F合成药物生产工艺设备不完全符合点源条件,依据<sup>18</sup>F较集中的主要工艺设备(交换柱和反应瓶)的结构尺寸,对<sup>18</sup>F 0.511 MeV $\gamma$ 射线的自吸收做了修正,同时还对在操作时间内<sup>18</sup>F活度衰减对参考点吸收剂量率的影响也做了修正,修正结果也列于表1中。从表1可看出,利

用换算公式得出的结果与使用中现场测量修正后的结果比较,尽管低 40%,但从辐射防护角度看是基本一致的,可以认为是安全的。

表 1 PET 专用工作箱(SD1 型)使用中现场测量结果整理

参考 $^{18}\text{F}$ 活度 点号 /GBq	距 PET 专用工作箱正面 5 cm 处的吸收剂量率/ $(\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})$			
	换算公式的结果	现场测量结果	修正后	
1 1.30	0.63	0.34	0.41	
2 10.4	0.50	0.22	0.29	
3 55.5	2.72			

#### 4 小 结

(1)用 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  放射源替代 $^{18}\text{F}$  检验 PET 专用工作箱屏蔽性能的换算公式,基本上解决了 PET 专用工作箱屏蔽体屏蔽效果的检验问题。

(2)在检验屏蔽效果的同时,还须扫描式检测屏蔽体结构缝隙和屏蔽体中串通管道、孔洞等泄漏的  $\gamma$  辐射水平。这也是检查屏蔽体屏蔽效果和加工质量的指标之一。

(3)换算公式还可以用于操作  $\gamma$  射线能量大于 0.06~2 MeV 的工作箱屏蔽体屏蔽性能投产前的检验问题。

利用此换算公式,只需已知 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  点源的活度和测量 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  点源在参考点的吸收剂量率,便可计算出在此条件下相应 $^{18}\text{F}$  的活度,或计算出 PET 专用工作箱 $^{18}\text{F}$  活度达最大操作量时,在参考点的吸收剂量率,为评价 PET 专用工作箱的屏蔽效果提供可靠数据。

#### 参考文献:

- [1] EDGERDO BROWNE, FIERSTONE BR. Table of Radioactive Isotopes[M]. NY: John Wiley & Sons, 1986; 18.
- [2] 《计量测试技术手册》编辑委员会. 计量测试技术手册:第 12 卷,电离辐射[M],北京:中国计量出版社,1997;29-39.
- [3] 郭之虞,王宇钢,包尚联. 核技术及其应用的发展[J]. 北京大学学报(自然科学版),2003,39(增刊);82-91.
- [4] 陈绍亮,李蓓蕾,李彪,等. 核医学的发展前景和挑战——参加第 52 届美国核医学年会后的思考和体会[J]. 国外医学:放射医学核医学分册,2005,29(4):145-151.
- [5] 唐孝威. 核技术在医学中应用的对话[J]. 世界科技与发展,2000,22(1):26-29.
- [6] 王俊起.  $^{18}\text{F}$ -FDG PET/CT 的特点及其在肿瘤诊断中的应用[J]. 国外医学:放射医学核医学分册,2004,28(2):49-53.
- [7] 中华人民共和国国家标准 GB18871-2002. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].
- [8] 中华人民共和国核工业标准 EJ 380-89. 开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范[S]. 1.
- [9] 中华人民共和国行业标准 EJ/T 789-93. 核设施辐射屏蔽设计一般原则[S].
- [10] ICRP Publication 21. Data for protection Against Ionizing Radiation from External Sources——Supplement to ICRP Publication 15[R]. Oxford: Pergamon Press, 1973.
- [11] 李德平,潘自强. 辐射防护手册:第三分册,辐射安全[M]. 北京:原子能出版社,1990;30.