

文章编号: 1007-4627(2015)02-0212-06

吸入性氚化粒子在人体肺部组织中吸收剂量的研究

孙若凡¹, 毛莉², 邬琦琦¹, 安竹¹

(1. 四川大学原子核科学技术研究所, 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610065;
2. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 涉氚核设施在检修及退役时, 其产生的氚化粒子容易被工作人员误吸入, 并在呼吸系统的不同部位停留, 部分尺寸较小的粒子可能在肺泡间质区 (AI 区) 停留超过 1 年的时间。氚粒子通过 β 衰变释放电子, 在释放电子的同时以及释放的电子与周围原子相互作用还会分别产生出内、外韧致辐射, 这些都会对人体肺部组织造成辐射损伤。本文采用蒙特卡罗程序 PENELOPE 对多种氚化粒子在人体肺部组织中的吸收剂量进行了模拟计算, 特别是讨论了氚 β 衰变的内韧致辐射的贡献。研究发现, 电子辐射对人体肺泡产生的吸收剂量大于外、内韧致辐射, 但后两者作用距离较长, 对人体造成的影响重要; 电子辐射吸收剂量随着粒子尺寸的增大以及金属原子序数的增大而减小; 外韧致辐射吸收剂量随着粒子尺寸的增大而减小, 随着金属原子序数的增大而增大; 内韧致辐射吸收剂量随着粒子尺寸的增大以及金属原子序数的增大而减小。

关键词: 氚化粒子; 肺泡-间质区; 吸收剂量

中图分类号: TL72 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.02.212

1 引言

氚粒子普遍产生于涉氚的核设施中, 最典型的是核聚变托卡马克 (Tokamak) 装置, 在托卡马克装置的运行过程中, 其等离子体与第一壁 (first wall) 相互作用, 产生大量的氚化粒子, 这些氚化粒子的主要组成是 C, Be, W 等^[1]。在聚变装置的 D-T 运行后, 氚化粒子的总量能达到 6.2 g 氚^[1]。

在其它核设施中也会产生氚化粒子, 如: 钛金属经常被用作贮存氚气, 长期贮存会产生钛金属氚化物; 奥氏体不锈钢因其较好的抗腐蚀性及机械特性, 被广泛运用在核工业中, 但其延期使用会使氚和不锈钢体发生作用, 同样会产生氚化粒子^[2]。

大量的氚化粒子使得在该类核设施中长期工作的人员容易因为防护不当而吸入, 从而对身体造成内照射影响。2002 年, 美国国家太平洋西北实验室的科研人员对氚化粒子的能谱和剂量进行了研究^[3], 研究运用蒙特卡罗程序 PENELOPE^[4]模拟了吸入性金属 (Hf) 氚化粒子的电子辐射和外韧致辐射对人体肺部的吸收剂量。模拟结果表明, 氚化粒子电子辐射造成的吸收剂量大于外韧致辐射造成的吸收剂量, 且随着粒子半径的增大, 吸收剂量逐渐减小。

然而, 以上研究一方面未涉及聚变堆可能产生的氚化粒子, 另一方面未考虑内韧致辐射对吸收剂量的贡献, 本文将就此做进一步的研究。

2 研究方法

本研究将使用 PENELOPE 程序^[4]对氚化粒子产生的电子-光子输运进行模拟研究, 计算多种尺寸的氚化粒子在人体肺部组织中的吸收剂量。PENELOPE 程序是目前广泛使用的电子-光子输运蒙特卡罗程序之一, 可以模拟由原子序数 Z 为 1~92 的原子组成的材料中的电子及光子行为, 可模拟的能量范围为 50 eV~1 GeV, 程序中所涉及的物理过程都采用精确的模型描述, 所涉及的数据也是较新且可靠的。

2.1 氚化粒子选择

本文对研究的氚化粒子选择的原则是: 选择核聚变堆 (Be, C, W) 及相关核设施和核技术应用等方面 (Sc, Ti, Er, Hf) 产生的典型氚化粒子, 且原子质量分布有一定区间, 以便对不同原子质量的氚化粒子造成的吸收剂量大小进行比较。

对于氚化 Be 粒子的组成, 通过对聚变堆中子通量和 Be 转化为氚的分析^[2], 氚化 Be 粒子中氚的质量仅

收稿日期: 2014-06-18; 修改日期: 2014-07-11

作者简介: 孙若凡(1988-), 男, 四川成都人, 硕士, 主要从事核技术应用研究;

通信作者: 安竹, E-mail: anzhu@scu.edu.cn。

<http://www.npr.ac.cn>

占不到1%, 即分子式可取为 $\text{BeT}_{0.03}$; 对于氟化C粒子, 室温下碳晶格中氟碳的饱和度是 $\text{H}:\text{C} = 0.4$, 因此氟化C粒子的组成可取为 $\text{CT}_{0.4}^{[2,5]}$; 对于氟化W粒子, 由于W的低氟滞留性及原子质量远大于氟的原子质量, 氟化钨粒子 WT_x 的 x 可取为0; 对于其它金属氟化粒子, 根据反应条件分析^[2], 氟与金属的原子比最大可以达到2, 即可取为 ScT_2 , TiT_2 , ErT_2 , HfT_2 。由于氟在化合物中的质量比很小, 可采用单质材料的密度作为氟化粒子的密度, 或采用其它方法估计的密度^[3], 本文中 $\text{BeT}_{0.03}$ 、 $\text{CT}_{0.4}$ 、 WT_0 的密度采用的是 Be, C 和 W 的密度^[2], ScT_2 , TiT_2 , ErT_2 , HfT_2 的密度采用的是文献^[3]中给出的所谓最佳估计密度, 密度的选取不影响本文的分析结果, 如表1所列, 共7种氟化粒子:

表1 氟化粒子组成及密度

氟化粒子	原子序数Z	密度/(g/cm ³)	氟化粒子	原子序数Z	密度/(g/cm ³)
$\text{BeT}_{0.03}$	4	1.85	ErT_2	68	8.56
$\text{CT}_{0.4}$	6	2.30	HfT_2	72	11.67
ScT_2	21	3.10	WT_0	74	19.30
TiT_2	22	4.03			

2.2 人体组织及氟化粒子尺寸

不同大小的氟化粒子在呼吸系统分布和停留时间不同。国际辐射防护委员会(ICRP)所发布的“用于辐射防护的人体呼吸道模型”^[6], 将人类呼吸道分为4个区:(1)胸腔外区(ET), 包括前鼻通道(ET1)、后鼻通道、口腔、咽、喉(ET2); (2)支气管区(BB), 包括气管和支气管; (3)细支气管区(bb), 包括细支气管和终末细支气管; (4)肺泡-间质区(AI), 包括呼吸细支气管、肺泡小管、带有小泡的小囊和间质结缔组织。

粉尘颗粒在呼吸系统停留、沉积过程主要取决于颗粒的空气动力学直径(d_{ae})。相关研究表明^[7-8], 对于 $d_{ae} \geq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒, 大部分在ET1区停留不超过1天后便被清除, 剩余的大颗粒在吸入后的几分钟内便被吞咽, 不会进入ET2区以下的呼吸系统; 对于 $d_{ae} \leq 10 \mu\text{m}$ 的较小颗粒, 不但可以进入ET2区以下的呼吸系统, 而且可以停留较长的时间, 其中, 停留在BB区和bb区的颗粒, 通常在几小时至几天内随着呼吸道黏液被清除, 停留在AI区的颗粒, 大部分能停留2个月到1年, 部分微小的甚至能在AI区停留几年的时间。

因此, 在ET1、ET2、BB及bb区停留的颗粒, 都将被很快通过吞咽及溶入呼吸粘液的途径清除, 只有进入到AI区的颗粒($d_{ae} \leq 10 \mu\text{m}$), 会在呼吸系统中停留

较长时间, 会对人体造成内辐照损伤。因此, 本文的研究对象为AI区, 取PENELOPE数据库中的ICRU四元素(H, C, N, O)软组织进行模拟^[3-4], 密度为 1 g/cm^3 , 且氟化粒子的直径为小于 $10 \mu\text{m}$ 。

2.3 氟粒子的放射性

氟是一种具有 β 放射性的核素, 它能释放最大动能为 18.6 keV 的具有连续能量分布的电子谱。根据费米 β 衰变理论, 核素的 β 衰变能谱可用以下公式表达^[9]:

$$N(W) = C \cdot F(Z, W) \sqrt{W^2 - 1} (W_0 - W)^2 W, \quad (1)$$

其中: $W = E/m_e c^2 + 1$, $W_0 = E_m/m_e c^2 + 1$, E 和 E_m 分别代表了 β 衰变电子的动能及最大动能, m_e 代表电子静止质量, c 代表光速; C 为常数; $F(Z, W)$ 为费米函数:

$$F(Z, W) = \frac{\nu}{[1 - \exp(-\nu)]}, \quad (2)$$

其中

$$\nu = 4\pi\alpha \cdot \frac{W}{\sqrt{W^2 - 1}}, \quad (3)$$

α 为精细结构常数。通过上述公式可以得到氟 β 衰变的电子能谱, 在本文模拟研究中, 我们将使用该能谱进行抽样。

氟衰变放出的 β 射线与周围的原子发生作用, 使 β 射线的能量、方向发生改变, 将产生连续分布的韧致辐射X射线, 这种韧致辐射X射线也称为外韧致辐射X射线。在PENELOPE程序中, 外韧致辐射X射线将通过其微分截面及形状函数模拟^[10-12]。

氟衰变放出 β 射线的同时还会释放出另一种连续X射线(即内韧致辐射X射线), 其量子理论已由Knipp、Uhlenbeck和Bloch给出^[13-14], 从经典的观点可理解为^[13]: 当氟发生 β 衰变时, 其核内的一个中子在转变成质子时, 同时产生一个 β 电子和一个中微子, 这个 β 电子在此过程中获得了动能, 因此按经典理论也会产生韧致辐射, 这种韧致辐射称为内韧致辐射。许多学者发展了计算内韧致辐射X射线的理论模型, 在本研究中, 采用Knipp、Uhlenbeck和Bloch发展的如下模型计算^[15]:

$$S(w) = \int_{1+w}^{W_0} \frac{\alpha \sqrt{(W-w)^2 - 1}}{\pi w \sqrt{W^2 - 1}} \left\{ \frac{W^2 + (W-w)^2}{W \sqrt{(W-w)^2 - 1}} \times \ln \left[(W-w) + \sqrt{(W-w)^2 - 1} \right] - 2 \right\} N(W) dW, \quad (4)$$

其中: $w = k/m_e c^2$, k 代表内韧致辐射光子能量; $S(w)$ 代表每次 β 衰变单位能量间隔放出内韧致辐射光子的几率; $N(W)$ 是式(1)所表示的氟衰变 β 电子能

谱；其它参数与式(1)~(3)中的含义一样。通过该模型，可得到内韧致辐射能谱。在本模拟研究中，我们将使用该能谱进行抽样。通过该理论模型得到的内韧致辐射能谱与实验谱吻合很好^[15]。

通过对大于 100 eV 以上的内韧致辐射能谱进行积分，我们可得出^[16]，每抽样一个内韧致辐射光子相当于抽样了 9543.3 个氡衰变释放的电子。因此，在以下结果分析时，模拟出的内韧致辐射能量沉积需除以 9543.3 后才可与模拟电子的能量沉积进行比较。根据式(1)和(4)计算的氡β衰变的电子能谱和内韧致辐射能谱图已在文献[16]的图 1 中给出。

2.4 模拟模型

模拟几何模型(图 1)由两部分组成：(1) 氟化粒子： $d_{ae} \leq 10 \mu\text{m}$ 的氟化粒子经过 ET1、ET2、BB 及 bb 区后，最终到达 AI 区，我们选择 2.1 节中的各元素氟化粒子作为模拟对象。为对比不同尺寸大小的氟化粒子造成的辐射能量沉积，粒子直径分别取为 0.1, 1, 5, 及 10 μm 。(2) AI 区：AI 区是本模拟中受氟化粒子辐射损伤的主要组织，厚度取为距中心距离 25 μm ，此距离已远大于氟化粒子电子、外韧致辐射、内韧致辐射的辐射范围。将距粒子中心 25 μm 的区域分成若干 1 μm 厚度的区域，通过 PENELOPE 程序模拟计算出的每个区域的辐射能量沉积，再除以每个区域的质量，便可得到每个区域的吸收剂量。另外，本文所计算的吸收剂量是指每次 β 衰变所产生的吸收剂量。

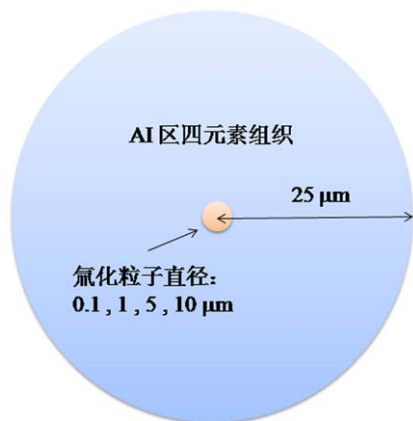


图 1 (在线彩图) 氟化粒子在 AI 区四元素(H, C, N, O)软组织中的模拟几何模型图

图 2 以直径为 0.1 μm 的 HfT_2 粒子为例，显示了在粒子表面处的电子、外韧致辐射、内韧致辐射能谱，图上外韧致辐射、内韧致辐射能谱分别放大了 200 和 2000 倍，外韧致辐射能谱上可见叠加有 O 元素的 K 壳和 Hf 元素的 M 壳特征 X 射线。

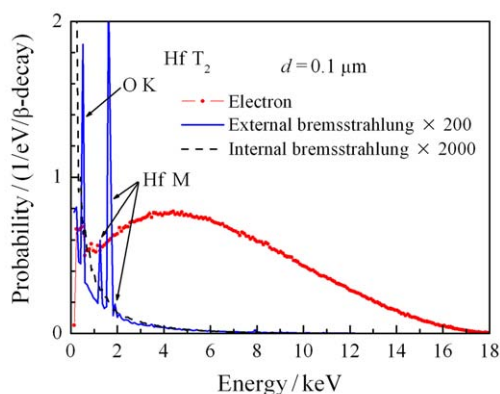


图 2 (在线彩图) 直径 0.1 μm 的 HfT_2 粒子表面处的电子、外韧致辐射、内韧致辐射能谱
外韧致辐射、内韧致辐射能谱分别放大了 200 和 2000 倍。

3 结果与分析

3.1 电子辐射、外韧致辐射结果与分析

图 3 以 HfT_2 粒子为例，对不同尺寸的同类型氟化粒子的电子辐射、外韧致辐射在周围 AI 区组织产生的吸收剂量大小进行对比，讨论分析如下。

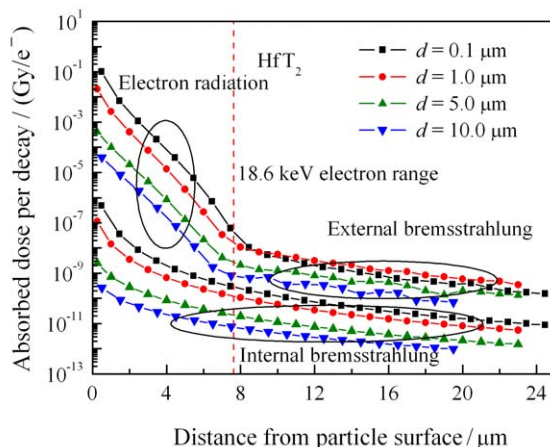


图 3 (在线彩图) 不同尺寸大小的 HfT_2 粒子电子辐射、外韧致辐射、内韧致辐射吸收剂量对比图
18.6 keV 电子在四元素软组织中的射程用虚线表示。

AI 组织受到的电子辐射和外韧致辐射产生的吸收剂量随着距粒子表面距离的增大而近似呈双指数下降，这是辐射沉积能量逐渐衰减的结果，与文献[3]的结果一致。

下降曲线在 7~8 μm 出现拐点。根据电子射程的计算^[17]，动能为 18.6 keV 的电子在人体软组织中的射程约为 7.63 μm ，即距粒子表面为 7.63 μm 以内的吸收剂量主要由电子辐射造成，7.63 μm 以外的吸收剂量为外韧致辐射造成。外韧致辐射造成的吸收剂量的下降幅度比电子辐射的小，这是因为外韧致辐射 X 射线的穿透力较电子更强。

对于不同尺寸的粒子, 大粒子的吸收剂量较小粒子的吸收剂量小, 这主要是因为大粒子内部对电子及外韧致辐射 X 射线有较大的阻止和吸收作用。

同样, 对不同尺寸的 $\text{BeT}_{0.03}$, $\text{CT}_{0.4}$, ScT_2 , TiT_2 , ErT_2 , WT_0 粒子进行了模拟计算, 电子辐射、外韧致辐射吸收剂量同图 3 趋势一致。

图 4 对相同尺寸(以直径为 $0.1 \mu\text{m}$ 为例)的 7 种不同氟化粒子的电子辐射吸收剂量和外韧致辐射吸收剂量进行对比, 讨论分析如下。

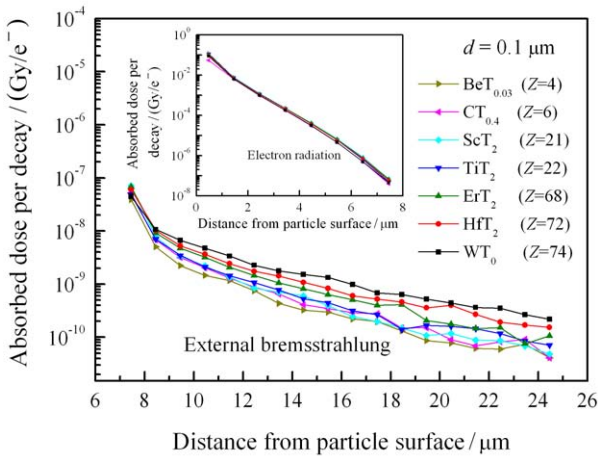


图 4 (在线彩图) 7 种直径为 $0.1 \mu\text{m}$ 的氟化粒子电子辐射吸收剂量和外韧致辐射剂量吸收剂量比较图
大图中是外韧致辐射剂量吸收剂量, 插入的小图中主要是电子辐射吸收剂量。

相同尺寸的不同种类氟化粒子的电子辐射吸收剂量差别较小, 但原子序数大的氟化粒子总体上还是比原子序数小的粒子的电子辐射吸收剂量小, 这是因为大原子序数的原子对电子阻止作用较大一些。不同种类粒子的外韧致辐射吸收剂量区别较大, 原子序数大的粒子比原子序数小的粒子的外韧致辐射吸收剂量大, 这是因为电子与原子序数较大的原子相互作用产生的外韧致辐射较强(外韧致辐射截面与原子序数 Z 的平方成正比)。

3.2 内韧致辐射结果与分析

以 HfT_2 粒子为例, 图 3 中也对不同尺寸大小的同类型氟化粒子内韧致辐射在周围 AI 区组织中产生的吸收剂量进行对比, 讨论分析如下。

AI 组织受到的内韧致辐射吸收剂量随着距粒子表面距离的增大而指数下降。相较于外韧致辐射剂量的衰减, 内韧致辐射的衰减更加平滑, 这主要是因为本文的内韧致辐射模拟是按初级射线处理的, 而外韧致辐射模拟时是氟衰变电子与金属原子、AI 区原子作用后的次级射线。对不同尺寸大小的粒子, 大尺寸粒子的辐射吸收剂量较小尺寸粒子的吸收剂量小, 这主要是因为大尺

寸粒子内部对内韧致辐射有较大的吸收作用。

对相同尺寸大小的不同粒子的内韧致辐射吸收剂量也进行对比, 讨论分析如下。

对于直径较小(如 $0.1 \mu\text{m}$)的粒子, 不同种类粒子的内韧致辐射吸收剂量区别不大(图上不易区别, 故未给出图), 这是因为小尺寸粒子对内韧致辐射 X 射线吸收非常有限, 内韧致辐射 X 射线穿透力较强所致。但从图 5 可以看出, 直径较大(如 $10 \mu\text{m}$)的不同种类粒子的内韧致辐射吸收剂量体现出明显差别, 小原子序数 Z 的氟化粒子的内韧致辐射吸收剂量比大 Z 氟化粒子大, 这是因为小原子序数 Z 的氟化粒子对 X 射线吸收较大 Z 氟化粒子弱。

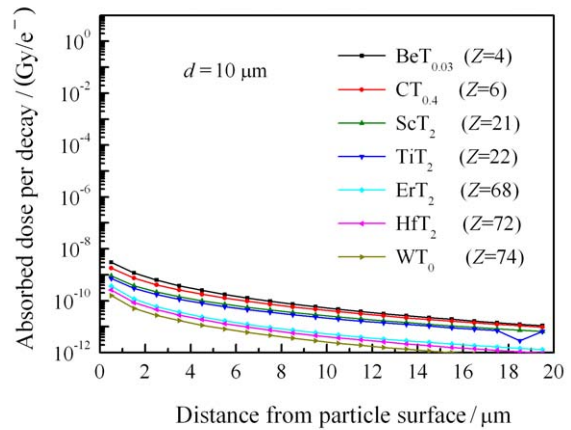


图 5 (在线彩图) 7 种直径为 $10 \mu\text{m}$ 的粒子内韧致辐射吸收剂量比较图

3.3 电子辐射、外韧致辐射、内韧致辐射综合分析

图 3 和图 6 分别以 HfT_2 和 $\text{CT}_{0.4}$ 粒子为例, 将电子辐射、外韧致辐射、内韧致辐射的吸收剂量结果进行

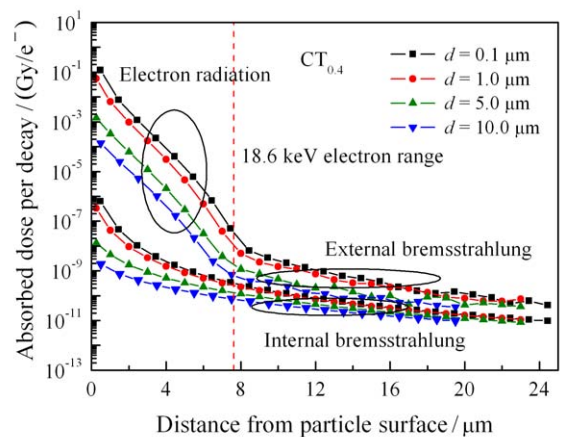


图 6 (在线彩图) 不同尺寸大小 $\text{CT}_{0.4}$ 粒子电子辐射、外韧致辐射、内韧致辐射吸收剂量比较图
18.6 keV 电子在四元素软组织中的射程用虚线表示。

对比分析。

由图 3 和图 6 可以看出, 辐射吸收剂量从大到小排序是: 电子辐射、外韧致辐射、内韧致辐射。虽然电子辐射的吸收剂量远大于外韧致辐射、内韧致辐射, 但由于其作用范围有限(距粒子表面 $7.63 \mu\text{m}$ 以内), 而且通常吸入性氟化粒子会被肺泡中的黏液、巨噬细胞等包裹, 所以吸入性氟化粒子对人体肺泡造成的辐射伤害可能主要是韧致辐射带来的^[3], 因此内、外韧致辐射的作用是很重要的。通过图 3 和图 6 的对比还可以看出, 小 Z 氟化粒子比大 Z 氟化粒子的内韧致辐射吸收剂量大(3.2 节已指出), 且小 Z 氟化粒子内韧致辐射吸收剂量与外韧致辐射吸收剂量的比(以 $\text{CT}_{0.4}$ 粒子为例, 可达到 20% 左右)较大 Z 氟化粒子时增加。因此, 相较于吸入大 Z 氟化粒子, 若吸入小 Z 氟化粒子(主要是聚变堆中产生的 Be, C 等氟化粒子), 内韧致辐射对吸收剂量的相对贡献会更大, 更不能忽视。

4 结论

本文根据核设施可能产生的氟化粒子、ICRP 第 66 号出版物及有关研究, 选择出具有代表性的 7 种氟化粒子, 以及可以在人体呼吸系统中沉积的 4 种氟化粒子尺寸, 采用蒙特卡罗模拟方法, 计算分析了氟化粒子 β 衰变在人体组织中产生的吸收剂量分布, 特别是讨论了氟 β 衰变内韧致辐射的贡献。

本文计算结果表明: 氟化粒子的电子辐射、外韧致辐射、内韧致辐射吸收剂量都随着距离的增大而减小; 电子辐射吸收剂量随着粒子尺寸的增大以及原子序数的增大而减小; 外韧致辐射吸收剂量随着粒子尺寸的增大而减小, 随着原子序数的增大而增大; 内韧致辐射吸收剂量随着粒子尺寸的增大以及原子序数的增大而减小。考虑到肺泡黏液及巨噬细胞对辐射范围较小的电子辐射的阻止作用, 吸入性氟化粒子对人体肺泡造成的辐射伤害可能主要是韧致辐射带来的, 因此内、外韧致辐射的作用是很重要的, 且内韧致辐射不可忽视, 特别是对小 Z 氟化物, 内韧致辐射对吸收剂量的相对贡献会更大。本文的结果, 特别是内韧致辐射对吸收剂量的贡献, 对进

一步研究氟化粒子对人体的辐射损伤具有借鉴作用。

参考文献:

- [1] DI PACE L, PATEL B. *Fusion Eng Design*, 2005, **75-79**: 1181.
- [2] RICHARDSON R B, HONG A. *Health Phys*, 2001, **81**(3): 313.
- [3] STROM D J, STEWART R D, MCDONALD J C. *Radiation Protection Dosimetry*, 2002, **98**(4): 389.
- [4] SALVAT F, FERNÁNDEZ-VAREA J M, SEMPAU J. *PENELOPE-2008, A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*[M]. Issy-les-Moulineau, France: OECD/NEA Data Bank, 2008.
- [5] HAASZ A A, FRANZEN P, DAVIS J W, *et al.* *J Appl Phys*, 1995, **77**: 66.
- [6] International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Annals of the ICRP*, 1994, **24** (1-4). Elsevier Science Ltd, Oxford.
- [7] BAILEY M R. *Radiation Protection Dosimetry*, 1994, **53** (1-4): 107.
- [8] BAILEY M R, GUILMETTE R A, JARVIS N S, *et al.* *Radiation Protection Dosimetry*, 1998, **79**(1-4): 17.
- [9] MATSUYAMA M, WATANABE K, HASEGAWA K. *Fusion Eng Design*, 1998, **39-40**: 929.
- [10] SELTZER S M, BERGER M J. *Nucl Instr and Meth B*, 1985, **12**: 95.
- [11] SELTZER S M, BERGER M J. *At Data Nucl Data Tables*, 1986, **35**: 345.
- [12] ACOSTA E, LLOVET X, SALVAT F. *Appl Phys Lett*, 2002, **80**: 3228.
- [13] BLOCH F. *Phys Rev*, 1936, **50**: 272.
- [14] KNIPP J K, UHLENBECK G E. *Physica*, 1936, **3**: 425.
- [15] CENGIZ A, ALMAZ E. *Radiat Phys Chem*, 2004, **70**: 661.
- [16] MAO L, AN Z, LIANG J H, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 2011, **269**: 105.
- [17] BERGER M J, COURSEY J S, ZUCKER M A, *et al.* *ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (version 1.2.3)*[EB/OL] [2014-03-01]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2005. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.

Simulation Investigations on the Absorbed Dose in Lung Tissue from Inhaled Tritiated Particles

SUN Ruofan¹, MAO Li², WU Qiqi¹, AN Zhu¹

(1. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, SiChuan China)

Abstract: Some tritium relevant nuclear facilities, such as Tokamak, can produce tritiated particles. There is the possibility for the staffs to inhale the tritiated particles by accident in the process of maintenance or decommission of these facilities. Tritium decays to ^3He , during which the beta electron and the internal bremsstrahlung are released. Meanwhile, the released electrons will interact with the surrounding atoms, and the external bremsstrahlung will be generated. All the electrons, internal bremsstrahlung and external bremsstrahlung will deposit the radiation energies to lung tissues and generate the radiation damage. In this paper we studied the radiation doses by inhaled tritiated particles in lung tissues by Monte Carlo code PENELOPE, in particular, internal bremsstrahlung contribution was included. Our results demonstrated that (1) the dose caused by electron radiation is far higher than those of external and internal bremsstrahlung, which however shall not be negligible due to their long-distance effects; (2) the dose caused by electron radiation decreases as the particle size and metal atomic number Z increase; (3) the dose caused by external bremsstrahlung decreases as the particle size increases, but increases as the metal Z increases; (4) the dose caused by internal bremsstrahlung decreases as the particle size and metal Z increase.

Key words: tritiated particle; lung tissue; absorbed dose

Received date: 18 Jun. 2014; Revised date: 11 Jul. 2014

Corresponding author: AN Zhu, E-mail: anzhu@scu.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>