

## 南京铱-192 放射源丢失事故受照人员物理剂量初步估算

周晓剑, 周启甫, 王晓涛, 彭建亮, 陈栋梁

**摘要:** 调查南京铱-192 放射源丢失辐射事故的发生经过和受照人员, 估算重点关注的人员物理剂量。采用点源公式估算受照者所处位置剂量率, 利用有关参数、因子估算吸收剂量和有效剂量。本事故导致多人受照, 其中王某大腿局部剂量高达 150 Gy, 手部剂量 14 Gy, 全身有效剂量约 2.5 Sv, 染色体畸变生物剂量估算为 1.3 Sv; 王妻全身有效剂量约 270 mSv, 其他人员小于 40 mSv。王某全身和局部受照剂量较大, 根据临床表现和生物剂量诊断为急性轻度放射性病; 其他人员无明显临床症状。

**关键词:** 铱-192; 放射源; 辐射事故; 受照人员; 剂量估算

**Preliminary Estimation of Physical Doses of Exposed Individuals in Radiation Accident of Nanjing Iridium-192 Radioactive Source Loss** ZHOU Xiao-jian, ZHOU Qi-fu, WANG Xiao-tao, PENG Jian-liang, CHEN Dong-liang (Nuclear and Radiation Safety Center of Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China). Address correspondence to CHEN Dong-liang, E-mail: chendongliang@chinansc.cn · The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

**Abstract:** This article described the loss of iridium-192 radioactive source in Nanjing and estimated the physical doses of exposed individuals. Point source formula was used to estimate the dose rates of the exposed individuals at distances from the point source. Absorbance doses and effective doses were estimated using relevant parameters and factors. Several people were exposed in the accident. The man, surnamed Wang, was exposed to iridium-192 with a thigh dose as high as 150 Gy, a hand dose up to 14 Gy, and a whole-body effective dose of 2.5 Sv; his biological dose estimate of chromosomal aberration was 1.3 Sv. The whole-body effective dose was about 270 mSv for his wife and less than 40 mSv for the other exposed individuals. Wang reported higher whole-body and partial-body radiation doses and diagnosed as acute and mild radiation-induced diseases according to the clinical manifestations and biological doses, while others have no obvious clinical symptoms.

**Key Words:** iridium-192; radioactive source; radiation accident; exposed individual; dose estimation

南京 II 类铱-192 放射源  $\gamma$  射线探伤事故是一起放射源丢失导致多人受照的重大辐射事故。作者对该事故发生经过、受照人员情况等进行了现场调查, 初步估算了重点调查对象共 83 人的受照剂量, 拟为事故的应急处理和医学救治提供早期参考依据。

### 1 事故经过概况

2014 年 5 月 7 日凌晨 3 时, 天津某公司在南京中石化分公司的车间门口进行  $\gamma$  射线探伤。作业后, 操作人员在未核实源已回到贮存位的情况下, 手动解除安全锁, 卸下前导管, 导致放射源脱落并遗失在探伤作业点。操作人员使用监测仪测量探伤机表面剂量, 由于探伤机屏蔽由贫化铀制成, 且放射源掉在附近照射使得监测仪仍有报警音响。操作员误以为

源已收回, 随后将探伤机带回宿舍。该枚丢失的放射源 2013 年 12 月 14 日出厂, 出厂活度  $3.77 \times 10^{12}$  Bq, 经计算, 丢失时的活度约  $9.6 \times 10^{11}$  Bq, 属 II 类放射源。如果人体长时间、大剂量、近距离接触它, 可使人体细胞变性、坏死, 医学上叫放射性损伤, 超大剂量可导致死亡。

5 月 7 日 7 时中石化分公司 40 名工人 (A1~A40) 陆续来上班, 在探伤作业车间工作, 距遗失的放射源较近, 其中一人 (A1) 捡到放射源并随手丢弃。8 时工人王某捡到放射源后将其装入工作服上衣的右侧口袋, 回休息室致使一名室友受照。9 时王某带着放射源到厂区仓库门口搬工件, 一直工作到 11 时 30 分, 期间致 20 名工友 (B1~B20) 受照。工作结束后王某携带放射源骑自行车回家, 将放射源放在后院里杂物堆的一个编织袋中, 家中住有妻子、女儿、女婿及外甥女和 3 名租客。

5 月 9 日王某因害怕公安追查担责, 11 时打电话让其妻将装有放射源的编织袋转移到其父母家中, 其妻将装源袋放在其父卧室北侧的杂物间, 其父母家一楼住有王父、王母、王妹, 二楼住有 11 名房客 (C1~C11)。

5 月 10 日 6 时王某从其父家中取出源, 装在塑料袋中, 将

DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2014.0141

[作者简介] 周晓剑 (1981—), 男, 硕士, 工程师; 研究方向: 辐射防护与安全审评; E-mail: zhouxiaojian@chinansc.cn

[通信作者] 陈栋梁, E-mail: chendongliang@chinansc.cn

[作者单位] 中国环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082

源丢弃在房子侧后方 100 m 的草丛中。9 时环保部门发现源的位置,公安部门控制源周围区域,这期间 11 名房客在附近修路作业。

经过一天紧张有序的应急搜寻、定位和回收,现场应急人员(D1~D21)于 5 月 10 日下午 18 时,成功将放射源安全收贮到专用容器内,并送往江苏省放射性废物库贮存。

## 2 事故受照射人员物理剂量估算

### 2.1 受照人员调查

按照重点关注近距离(50 m 范围内)和较长时间(超过 10 min)接触或接近放射源的人员的调查原则,经走访排查,5 月 7—10 日期间,接触或接近放射源的受照人员、受照地点及距离如表 1 所示。

表 1 主要受照人员及受照情况

| 受照人员        | 受照地点或过程         | 与源的距离、屏蔽关系                               | 受照时间              |
|-------------|-----------------|------------------------------------------|-------------------|
| 王某(拾放放射源者)  | 捡拾、携带及丢弃过程等源在家里 | 5~20 cm(贴身携带)<br>5~20 m(家中),有 24 cm 砖墙屏蔽 | 3.5 h<br>约 24 h   |
| 王某妻子        | 转移源<br>源在家里     | 25 cm(携带)<br>5~20 m(家中),有 24 cm 砖墙屏蔽     | 5 min<br>约 47 h   |
| 第一个捡源工人 A1  | 探伤车间            | 5 cm(捡源、丢出)<br>3~10 m(丢弃后)               | 1 min<br>约 30 min |
| 室友          | 休息室             | 3 m(同屋休息)                                | 0.5~1 h           |
| 车间工人 A1~A40 | 探伤车间            | 3~20 m                                   | 0.5~1 h           |
| 修路工 B1~B20  | 仓库门口            | 10~20 m                                  | 2~2.5 h           |
| 王某家人及房客 6 人 | 王某家             | 8~20 m(家中),有 24 cm 砖墙屏蔽                  | 20~47 h           |
| 王某父母及妹      | 王某父母家一楼         | 5~10 m(家中),有 24 cm 砖墙屏蔽                  | 约 18 h            |
| 房客 C1~C11   | 王某父母家二楼         | 5~15 m(家中),有 24 cm 砖墙屏蔽                  | 约 10 h            |
| 修路工 C1~C11  | 放射源丢弃点附近        | 30~80 m                                  | 3 h               |

### 2.2 剂量估算方法

有效剂量估算采用《IAEA 辐射应急期间评价和响应的通用程序》(IAEA-TECDOC-1162)中推荐的剂量评价计算公式<sup>[1]</sup>:

$$E_{ext} = \frac{ACF_6 T_e (0.5)^{\frac{d}{d_{1/2}}}}{X^2} \quad (1)$$

$$D = \frac{ACF_7 (0.5)^{\frac{d}{d_{1/2}}}}{X^2} \quad (2)$$

上述公式中各参数的涵义与取值列于表 2。

表 2 各计算参数的涵义与取值

| 参数        | 涵义(单位)              | 取值方法                      |
|-----------|---------------------|---------------------------|
| $E_{ext}$ | 有效剂量(mSv)           | —                         |
| $D$       | 剂量率(mGy/h)          | —                         |
| $A$       | 源的活度(kBq)           | 有衰变公式计算                   |
| $T_e$     | 受照时间(h)             | 据调查确定                     |
| $CF_6$    | 转换因子[(mSv/h)/(kBq)] | 查 IAEA-TECDOC-1162 表 E1   |
| $CF_7$    | 转换因子[(mSv/h)/(kBq)] | 查 IAEA-TECDOC-1162 表 E2   |
| $X$       | 距源的距离(m)            | 据调查确定                     |
| $d_{1/2}$ | 半值层厚度(cm)           | 查 IAEA-TECDOC-1162 及防护手册等 |
| $d$       | 屏蔽厚度                | 据调查确定                     |

铯-192 放射源半衰期  $T=74$  d, 根据初始活度  $A_0(3.77 \times 10^{12}$  Bq)和源出厂日期,计算现存活度  $A_1=9.6 \times 10^{11}$  Bq, 1 m 处剂量率  $D=125$  mGy/h, 依次推算得: 0.25 m 处剂量率为 2000 mGy/h, 5 m 处剂量率为 5 mGy/h, 10 m 处剂量率为 1.25 mGy/h, 20 m 处剂量率为 0.31 mGy/h, 以此关系类推。

### 2.3 剂量估算结果

2.3.1 受照人员估算结果 本次放射源丢失事故共有近百人接近或接触放射源,对其中可能受照剂量较大的 83 人进行了剂量估算,采取保守估计,在收集相关信息时通过人员回忆,在

时间和距离等参数可能存在较大的误差时,尽可能采用最大的可能受照剂量来估算,结果见表 3。

表 3 主要受照人员受照剂量及影响

| 受照人员         | 受照剂量估算值                                                             | 受照后果                      |
|--------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 王某(拾放放射源者)   | 局部剂量(右大腿 150 Gy, 手部 14.3 Gy)<br>全身剂量约为 2.5 Sv(主要考虑性腺膀胱、红骨髓、皮肤等组织器官) | 右腿红肿、溃疡;右手轻微红肿、未灼伤溃疡,密切观察 |
| 王妻           | 手部剂量: 160 mGy;<br>全身剂量: 270 mSv                                     | 血液指标基本正常,无临床症状            |
| 第一个捡源工人 A1   | 手部剂量: 0.8 Gy;<br>全身剂量: 8.3 mSv                                      | 无临床症状                     |
| 室友           | 全身剂量: 13 mSv                                                        | 无临床症状                     |
| 车间工人 A1~A40  | 全身剂量: 0.07~6.25 mSv                                                 | 无临床症状                     |
| 修路工 B1~B20   | 全身剂量: 0.78~3.13 mSv                                                 | 无临床症状                     |
| 王某家人及房客共 6 人 | 全身剂量: 25~37.5 mSv                                                   | 无临床症状                     |
| 王某父母及妹       | 全身剂量: 0.09~1.22 mSv                                                 | 无临床症状                     |
| 房客 C1~C11    | 最大受照剂量: $\leq 6.4$ mSv                                              | 无临床症状                     |
| 修路工 C1~C11   | 最大受照剂量: $\leq 0.42$ mSv                                             | 无临床症状                     |

2.3.2 应急人员测量结果 参与事故应急的环保部门工作人员均佩戴个人剂量计和个人剂量报警仪,事故后对热释光个人剂量计进行了监测,在放射源搜寻和收贮等应急处理人员中,有 1 人受照剂量超过 5 mSv(7.6 mSv),3 人剂量在 3~5 mSv,其余 17 人均小于 1 mSv。

## 3 讨论

电离辐射对人员造成的伤害与人员的受照剂量相关,在事故的应急调查中应尽早估算出人员所受的剂量,为及时进行医学救治和判断预后提供重要依据。本次物理剂量估算是通过

事故过程和场景中各参数的重新构建来对事故人员进行的剂量估算,初步给出了全身受照剂量和局部受照剂量。

根据本次应急调查显示,受照剂量最大者为王某,由于其接触时间最长,距离最短。放射源位于右上衣口袋,且因工作时站立和下蹲两种方式,右侧大腿出现两处红肿区域,腿部局部剂量大,约达 150 Gy,一般 >25 Gy 即可引起溃疡<sup>[2]</sup>;全身物理剂量约 2.5 Sv。

事故后,王某被转移到苏州大学第二附属医院中国核工业辐射损伤医学应急中心接受治疗。利用人体外周血淋巴细胞培养,在显微镜下观察染色体畸变率的染色体畸变生物剂量估算方法,测得王某全身受照剂量为 1~2 Sv(约 1.3 Sv),约为保守的物理剂量估算结果的 52%。根据此受照剂量可以判断王某右腿会出现红肿、溃疡等症状,但无生命危险。经了解,5—7 月份,王某右腿出现红肿、溃疡等症状,溃疡范围呈增大趋势,正在接受积极的救治,争取保住右腿不截肢,无生命危险。

王某妻子转移放射源过程中和在家中长时间接近放射源,可能的受照剂量为 270 mSv,远超过现行防护基本标准<sup>[3]</sup>中公众年剂量限值( $\leq 1$  mSv)。除王某及其妻子外,其余受照人员中有 6 人(王某家人及房客)受照剂量可能大于 20 mSv,但最高值低于 40 mSv,根据剂量效应关系,不会造成放射性损伤。除以上人员外,其余 75 人受照剂量均小于 20 mSv,不会出现临床反应。

参与现场应急处置的工作人员应急受照剂量小于现行防护基本标准中规定的最大单一年份个人剂量限值( $\leq 50$  mSv)和 5 年内平均每年所受最大个人剂量限值( $\leq 20$  mSv),可见事故应急处理处置措施基本得当。应急工作后,按照干预和医学

处理原则<sup>[4]</sup>,对应急受照人员提出了医疗检查的建议。

在核与辐射事故发生后,物理剂量估算是目前用于放射性事故剂量估算方法中最常用的方法。但物理剂量估算由于受很多复杂因素的影响<sup>[5]</sup>,一般很难做到准确。影响可靠性的主要因素有:放射源与受照人员之间的各几何条件——取决于当事人对事故过程描述是否精准。其中,存在事故照射时间和人—源几何相对位置的不准确性、受照时间是否准确以及辐射场测量不确定度等。因此,物理剂量结果应与生物学的剂量估计值以及临床判断等进行比较,综合分析,最终来进一步修正与评价<sup>[6]</sup>。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

#### 参考文献:

- [1] IAEA. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency[M]. IAEA, 2000.
- [2] 程天民,栗永萍.核事件医学应急与公证防护[M].北京:人民军医出版社,2011.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [4] 中华人民共和国卫生部. GBZ 113—2006 核与放射事故干预及医学处理原则[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [5] 姚仲甫,卢国甫.河南“4.26”钴-60源辐射事故的经过和早期物理剂量估算[J].中华放射医学与防护杂志,2001,21(3):163-164.
- [6] 张继勉,牛振.某油田 Cs-137 源误照事件调查与模拟现场物理剂量估算[J].中华放射医学与防护杂志,2012,32(6):649-651.

(收稿日期:2014-07-04)

(英文编辑:汪源;编辑:王晓宇;校对:丁瑾瑜)

#### 【EHP 专栏】

## 护士健康研究队列中累计铅暴露与绝经年龄

Ki-Do Eum, Marc G. Weisskopf, Linda H. Nie, Howard Hu, Susan A. Korrick

**摘要:** [背景] 已知绝经期提前与许多不良健康结局相关,包括心血管疾病的患病率和死亡率的风险增加。研究者们已经发现铅不利于女性的生殖功能,但是尚无研究探讨普通人群的铅暴露是否与绝经年龄改变存在相关性。[目的] 评估累积铅暴露与自然绝经年龄之间的相关性。[方法] 从参加护士健康研究(Nurses' Health Study)的 434 名女性中获得自述绝经状态,并使用 K-壳层 X 射线荧光(一种累积铅暴露的生物学标志物)测量骨铅浓度。[结果] 平均( $\pm$ SD)自然绝经年龄为( $50.8 \pm 3.6$ )岁。较高的胫骨铅水平与较小的绝经年龄相关。在校正分析中,胫骨铅水平为最高三分位的女性其平均绝经年龄比最低三分位的女性年轻 1.21 岁(95%CI:  $-2.08 \sim -0.35$ )(趋势  $P=0.006$ )。虽然病例的数量较少( $n=23$ ),但胫骨铅水平为最高三分位的女性与最低三分位者相比,绝经期提前( $<45$  岁)的比值为 5.30(95%CI:  $1.42 \sim 19.78$ )(趋势  $P=0.006$ )。髌骨或血液中的铅与绝经年龄之间没有相关性。[结论] 上述研究结果支持低水平的累积铅暴露与较早的绝经年龄之间存在相关性。这些数据提示,低水平铅暴露可能通过影响中老年妇女的绝经年龄从而影响绝经期相关的健康结局。

原文详见 *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(3): 229-234.