

# 土壤氡析出率的连续测量研究

孙轲<sup>1</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 郭秋菊<sup>1</sup>

(1. 北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

2. 防化研究院第二研究所, 北京 102205)

**摘要:** 基于流气式测量原理, 自行研究开发了土壤氡析出率连续测量装置, 并在北京西北地区开展了为期24天的现场连续测量。野外现场实测证实: 研发的土壤氡析出率连续测量装置满足现场连续测量需求。氡析出率连续测量结果表明: 降雨对土壤氡析出率有显著影响。降雨过程中, 氡析出率会明显上升, 且氡析出率上升的幅度随着降雨量的增加而增加; 无降雨情况下, 土壤氡析出率呈现明显的日变化规律, 造成此现象的主要原因在于土壤湿度的周期性变化。

**关键词:** 土壤氡析出率; 连续测量; 降雨; 日变化规律; 土壤湿度

中图分类号: R144.1

文献标识码: A

土壤氡析出率指单位时间、单位面积地面土壤释放到空气中氡的量( $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 是影响室内外氡水平的一个关键因素。土壤氡析出率现场连续测量对了解土壤氡析出率的变化及其影响因素具有重要的意义。传统的土壤氡析出率测量主要以短时间的现场累积箱累积采样的抓取式测量为主, 测量数据时间代表性较差, 很难用于分析氡析出率与诸多影响因素的相互关系。氡析出率连续测量, 能够给出环境氡析出率变化的实时数据, 研究分析不同环境参数对析出率的影响, 在地震预报、铀矿治理、环境氡水平评价等方面得到大量的应用<sup>[1, 2]</sup>。

土壤氡析出率连续测量从理论上可以采用流气式测量原理, 也可以通过采用传动装置控制累积箱的开关, 实现土壤析出率定点半连续测量<sup>[3, 4]</sup>。近些年, 国外有利用流气式氡析出率连续测量方法研究采样速率对压差和氡析出率测量结果的影响的报道<sup>[5]</sup>, 并应用于铀尾矿处置场土壤氡析出率连续测量和尾矿处置效果评价。

本文在本实验室前期开展的析出率测量工作基础上, 自行研究搭建了土壤氡析出率连

续测量装置, 并在北京市西北地区某花园内开展了土壤氡析出率连续测量。该测量结果将作为北京市大气氡浓度扩散模型的输入源项。

## 1 测量方法

### 1.1 实验仪器及装置

土壤氡析出率连续测量系统主要由测氡仪、采样泵、累积箱以及土壤温湿度传感器构成, 测量装置实物图和示意图如图1所示。测氡仪选取 AlphaGUARD PQ2000 Pro (德国 Genitron Instruments GmbH 公司), 该测氡仪为基于最优化设计的电离腔型氡探测器, 能连续测定氡浓度、气候参数及  $\gamma$  计数率, 氡浓度测量灵敏度为  $1 \text{ cpm}/(20 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3})$ , 氡浓度探测下限为  $2 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ , 在国家计量院氡室进行过刻度。采样泵采用 AlphaPUMP, 抽气流速为  $0.3 \text{ L}/\text{min}$ 。累积箱为不锈钢罩体, 其内部有效体积  $V$  为  $0.016 \text{ m}^3$ , 箱底有效面积  $S$  为  $0.1075 \text{ m}^2$ 。温湿度传感器选择北京中西远大科技有限公司的 M267221 型土壤温湿度记录仪, 能连续记录土壤中的温湿度, 温度测量

收稿日期: 2012-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075009)。

作者简介: 孙轲(1988—), 男, 2010年7月毕业于河南理工大学应用物理专业, 现为北京大学物理学院粒子物理与原子核物理专业硕士研究生。

通讯作者: 郭秋菊。E-mail: qjguo@pku.edu.cn

误差为 ±0.5 °C ,湿度测量误差为 ±3% RH。

AlphaGUARD 测氡仪采用流气式测量模式,每 10 min 记录一次数据。土壤温湿度探测仪的探头埋在地表下 5 cm 处,监测表层土壤湿度的变化,测量间隔设为 10 min。进气口放置在离地约 1.5 m 高处,以减小大气氡浓度的影响。此外,由于此系统中抽气速率为 0.3 L/min(即 5 × 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s),而累积箱体积为

0.016 13 m<sup>3</sup>,所以土壤析出的钍射气在进入测氡仪(AlphaGUARD)之前有足够的时间衰变完全,因此可以忽略钍射气(<sup>220</sup>Rn)的影响。流气式土壤氡析出率连续测量中,累积箱放置于待测土壤表面以收集析出的氡气,在泵的作用下,由进气口吸入氡浓度可忽略的大气气体,同累积箱中的氡气体混合进入测氡仪,记录氡浓度数据,进而换算得到土壤氡析出率。

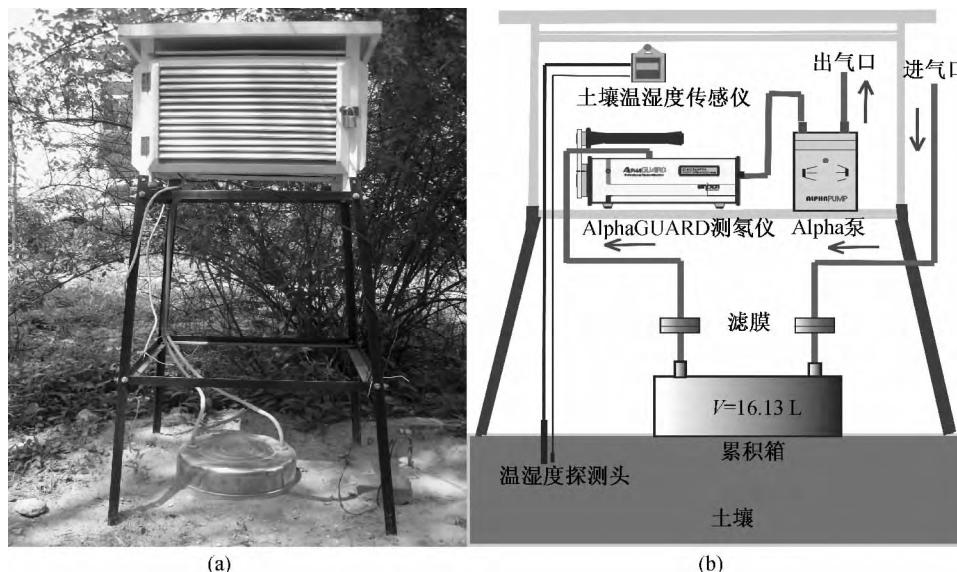


图 1 氡析出率连续测量系统示意图

Fig. 1 Scheme of continuous measurement system for radon exhalation rate

考虑 95% 的置信区间,本系统的灵敏度为 0.046 5 (mBq·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) / (Bq·m<sup>-3</sup>),氡析出率探测下限为 0.093 0 mBq·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

### 1.2 氡析出率连续测量原理

土壤氡析出率连续测量基本假设:土壤为均匀多孔介质;累积箱内部氡浓度分布均匀,且析出率与氡浓度处于动态平衡;土壤氡析出率在一个小时内近似无变化;忽略吸入空气中的氡气。

此时,累积箱内的氡浓度随时间的变化方程为

$$\frac{dA_{Rn}}{dt} = \frac{JS}{V} - \lambda_{Rn}A_{Rn} - \frac{\nu}{V}A_{Rn} \quad (1)$$

式中  $J$  为土壤氡析出率, mBq·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>;  $A_{Rn}$  为累积箱内的氡浓度, Bq·m<sup>-3</sup>;  $\lambda_{Rn}$  为氡的衰变常数,取值为 2.1 × 10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>;  $\nu$  为泵的抽气速率 5 × 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s;  $V$  为累积箱的体积 0.016 13 m<sup>3</sup>;

$\frac{\nu}{V}A_{Rn}$  表示由连续抽气导致的累积箱内氡浓度的变化项。在连续测量过程中,腔体内氡浓度处于“准平衡状态”,即上式等号左边为 0。此时,土壤氡析出率可以表示为:

$$J = \frac{(\lambda_{Rn} + \nu/V) VA_{Rn}}{S[1 - e^{-(\lambda_{Rn} + \nu/V)t}]} \quad (2)$$

由于实际测量中  $\nu/V$  (约 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>) 远大于氡的衰变常数(约 10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>),因此在计算过程中可将  $\lambda_{Rn}$  略去。且在氡析出率稳定的情况下,经过较长一段时间后 1 - e<sup>- $\nu/V$</sup>  趋近于 1。氡析出率计算公式最终可以简化为:

$$J = \frac{\nu A_{Rn}}{S} \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤氡析出率连续测量结果

本文研究建立的析出率连续测量装置,在

同一地点与抓取式测量方法进行过多次的对比, 二种方法吻合性良好。

采用本土壤氡析出率连续测量系统在北京市西北地区某花园中进行了为期 24 天的实

验测量(2012 年 4 月 17 日至 5 月 11 日), 测量结果如图 2 所示。为了分析方便, 对每一个小时的测量数据进行了平均。

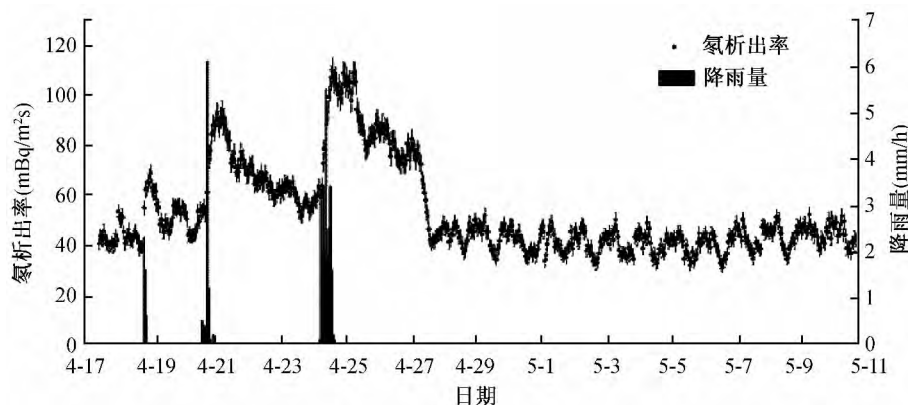


图 2 土壤氡析出率连续测量结果(4 月 17 日至 5 月 11 日)

Fig. 2 Continuous measurement results of radon exhalation rate in field

整个测量周期中,北京市有两次弱降雨和一次强降雨,降雨量和降雨时间如图 2 所示。从图 2 中可以看出,降雨对氡析出率有明显的影响。4 月 18 日 21:00 到 23:00 期间共有 4.5 mm 降水,析出率从  $(41.3 \pm 2.5) \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $(69 \pm 4.5) \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,4 月 20 日 16:00 到 21 日 1:00 共有 9.2 mm 降水,氡析出率上升到  $(94.5 \pm 4.3) \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,4 月 24 日 7:00 到 16:00 共有 26 mm 降水,析出率上升到  $(110 \pm 4.8) \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

降雨会增加土壤湿度,而在一定湿度范围内,土壤氡析出率随着湿度的增加而增加,超过饱和湿度后,土壤湿度的进一步增高会阻碍土壤孔隙中氡的扩散,从而降低析出率<sup>[6]</sup>。对于实验中的流气式析出率连续测量装置,降雨期间累积箱下面土壤湿度是通过与累积箱四周的土壤进行水分交换而来,而北京地区土壤比较干燥,上述强度的降雨并不能使土壤湿度达到饱和。因此,此种情况测量时,地表氡析出率会随着降雨而有所升高,且升高幅度随着降雨量的增加而增加,降雨停止之后,土壤氡析出率缓慢回落到正常水平。

无降雨期间(4 月 29 日至 5 月 11 日), 对此时间段内各个时刻的土壤氡析出率结

果进行平均,得到该时间段内土壤氡析出率的平均值为  $(42.5 \pm 2.6) \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,符合文献中所报道的北京地区土壤氡析出率的范围  $(3.1 \sim 49.9 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ <sup>[7]</sup>。

## 2.2 土壤氡析出率的日变化规律及其影响因素

从图 2 分析可看出,无降雨期间(4 月 29 日至 5 月 11 日)土壤氡析出率呈现周期性的日变化规律。将无降雨期间每天对应的同一时间段上的氡析出率测量结果平均,给出其变化范围,再将每个小时的数据绘制成如图 3 所示的箱形图。图中每组测量数据的中位数用矩形盒中的横线标示,算术平均值在矩形盒中用方块点标示,矩形盒的上下边对应数据的上四分位数与下四分位数,矩形盒的上边处线段到下边处线段之间的范围表示该组数据正常值的分布区间,异常值在图中用 × 标示。

从图 3 中看出,无降雨期间土壤氡析出率有较为明显的日变化规律,大致呈现上午高,下午低的情况。上午 11 点左右达到析出率的最高值,下午 18 点左右达到析出率的最低值。最高值和最低值的差高达  $11.5 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为了分析土壤氡析出率呈现明显日变化规律的原因,将氡析出率连续测量结果和温湿度测量结果同时绘制成图,如图 4 所示。

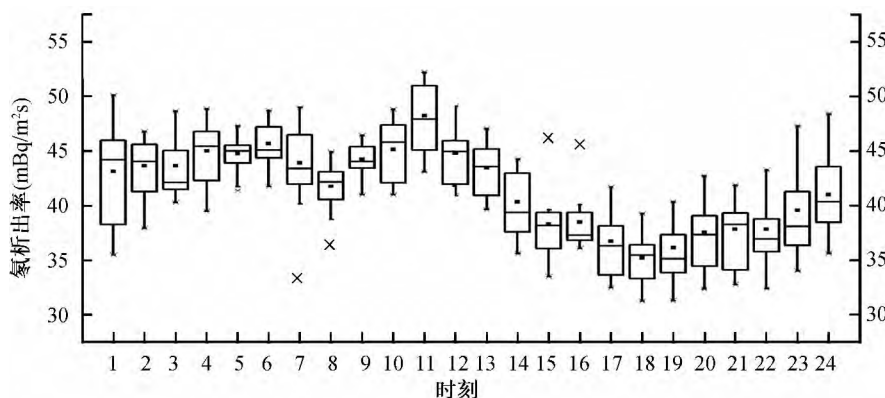


图 3 自 4 月 29 日至 5 月 11 日氡析出率日变化箱图

Fig. 3 Diurnal variation of radon exhalation rate from Apr 29 to May 11

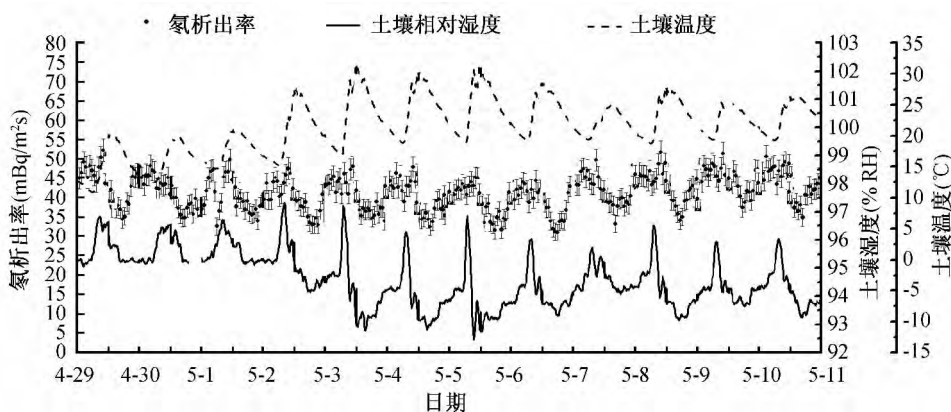


图 4 土壤氡析出率和温湿度连续测量结果

Fig. 4 Measurement results of radon exhalation rate and relative soil moisture as well as soil temperature

从图 4 看出,无降雨情况下土壤温湿度都呈现了明显的日变化规律,这与北京春季气候比较稳定、昼夜温差较为明显有关。比较不同天内的温度和土壤氡析出率,发现土壤温度较高时(如 5 月 3、4 日)和较低时(如 4 月 29、30 日)土壤氡析出率并没有太大的变化。因此,推测影响土壤氡析出率周期变化的主要原因在于土壤湿度周期性的变化,这同其他人研究结果类似<sup>[7]</sup>;土壤相对湿度越高,土壤析出率越大,呈现明显的正相关的相互关系。土壤相对湿度在上午 9—10 时达到最高值,午后会有明显的下降,在 2—4 时达到最低值,而土壤氡析出率的变化规律在时间上略有延迟,其主要原因在于日照导致土壤水分蒸发,造成了表层土壤相对湿度明显的日变化规律。而土壤相对湿度对氡析出率的影响,应与上述分析的降

雨对析出率的影响相同。

为了进一步分析土壤相对湿度和温度对土壤氡析出率的影响,将氡析出率结果按照土壤相对湿度和温度进行归类分析,即将相同相对湿度的数据提取出来,按照温度段进行平均,给出某相对湿度处,某温度段内氡析出率的平均值、方差和变化范围。分析结果列于表 1。

从表 1 可以看出,在相同的温度范围内,随着相对湿度的增加土壤氡析出率会有上升;而在相同的相对湿度下,不同温度的变化并没有导致氡析出率的明显变化。上述结果进一步证明了影响氡析出率变化的主导因素在于土壤相对湿度的变化,与温度的变化并没有直接明显的关系。事实上,土壤温度的变化也会导致土壤湿度的变化,故而,可以作为间接性影响因素起作用。

表 1 土壤相对湿度、土壤温度对土壤氡析出率的影响

Tab. 1 Relative humidities , and temperatures of soil and corresponding radon exhalation rates

土壤相对湿度 (% RH)	土壤温度 (°C)	氡析出率( $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )			
		均值	标准偏差	最小值	最大值
92	25 ~ 30	36.5	4.1	32.2	45.2
	20 ~ 25	39.8	3.4	31.5	47.5
93	25 ~ 30	37.5	4.3	30.2	51.8
	30 ~ 35	41.7	2.6	37.6	46.0
94	15 ~ 20	44.6	2.5	38.4	49.7
	20 ~ 25	41.8	4.9	31.9	52.4
	25 ~ 30	43.1	4.0	37.2	51.0
95	10 ~ 15	45.4	3.1	32.6	49.8
	15 ~ 20	39.3	3.5	33.3	48.3
	20 ~ 25	43.2	3.4	33.4	50.6
	25 ~ 30	43.5	3.7	36.8	50.2
96	10 ~ 15	43.6	3.6	35.0	48.8
	15 ~ 20	43.6	3.3	36.4	52.2
	20 ~ 25	44.0	2.6	39.3	49.8
97	15 ~ 20	45.5	2.9	40.9	50.8

### 3 结论

本研究基于流气式原理,自行研究开发了土壤氡析出率连续测量装置,并在北京市西北地区现场开展了为期 24 天的连续测量。现场连续实测显示该装置满足现场连续测量要求。目前短期的测量结果表明,降雨对土壤氡析出率有明显的影响。在降雨过程中,氡析出率有明显的上升。在一定降雨量范围内,氡析出率上升的幅度随着降雨量的增加而增加;无降雨情况下,土壤氡析出率呈现明显的日变化规律,造成此现象的主要原因在于土壤湿度的周期性变化。

目前开发的流气式氡析出率连续测量方法,从测量机理上分析,在环境氡析出率剧烈变化时,测量结果会有一定的延时。今后反扩散的精确修正也是连续测量方法有待明确解决的课题,如何快速准确地测量将是土壤氡析出率连续测量方法需要改进以期实现的目标。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Ferry C , Patrick Richon , Alain Beneito , et al. Evaluation of the effect of a cover layer on radon exhalation from uranium mill tailings: transient radon flux analysis [J]. Journal of Environmental Radioactivity , 2002 , 63( 1) : 49 - 64.
- [ 2 ] Masakazu OTA , Takao IIDA , Hiromi

YAMAZAWA , et al. Suppression of radon exhalation from soil by covering with clay-mixed Soil [ J ]. Journal of Nuclear Science and Technology , 2007 , 44( 5) : 791 - 800.

- [ 3 ] Ferry C , Beneito A , Richon P , et al. An automatic device for measuring the effect of meteorological factors on radon flux from soils in the long term [ J ]. Radiation Protection Dosimetry , 2001 , 93( 3) : 271 - 274.
- [ 4 ] Lehmann BE , Ihly B , Salzmann S , et al. An automatic static chamber for continuous radon - 220 and radon - 222 flux measurements from soil [ J ]. Radiation Measurements , 2004 , 38 ( 1) : 43 - 50.
- [ 5 ] Masahiro Hosoda , Tetsuo Ishikawa , Atsuyuki Sorimachi , et al. Development and application of a continuous measurement system for radon exhalation rate [ J ]. Review of Scientific Instruments , 2011 , 82 ( 1) : 015101 - 1 - 015101 - 4.
- [ 6 ] Nabil M Hassan , Masahiro Hosoda , Tetsuo Ishikawa , et al. Radon migration process and its influence factors; review [ J ]. Health Physics , 2009 , 44( 2) : 218 - 231.
- [ 7 ] Guo Qiuju , Sun Kainan , Cheng Jianping. Methodology study on evaluation of radon flux from soil in China [ J ]. Radiation Protection Dosimetry , 2004 , 112( 2) : 291 - 296.

## Study on Continuous Measurement Technique for Radon Exhalation Rate of Soil

Sun Ke<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>2</sup>, Guo Qiuju<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Chemical Defense, Beijing 102205)

**Abstract:** It is very important to measure radon exhalation rate from soil continuously for a better evaluation on the source of radon and its level, environmental radon exposure, and uranium tailings processing. Continuous measurement on radon exhalation rate of soil was studied theoretically and practically. As the result, a device was developed on basis of the flow air method, and a 24 days field continuous measurement was carried out in the northwest of Beijing with the device developed during spring 2012. It was indicated by the experimental results that rainfall has obvious effect on radon exhalation rate from soil. In the process of rainfall, radon exhalation rate increased apparently, and the increment of radon exhalation rate heightened with the rise of precipitation. For days of no rain, the radon exhalation rate from soil presented diurnal variation, and the diurnal periodical change of soil humidity was considered to be the main cause of this phenomenon.

**Key words:** radon exhalation rate; continuous measurement; precipitation; diurnal variation; soil humidity

---

(上接第 26 页, Continued from page 26)

## Experimental Study on Capturing and Encapsulating Radioactive Aerosol Generated in Plasma Cutting

Zhang Wenjun, Wu Mingliang, Wang Xudong, Wang Yongxian, Guo Lixiao, Liu Haiqing

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006)

**Abstract:** The radioactive aerosol and loose contamination generated in disassembling the contaminated equipment by plasma cutting was harmful to the operator's health. The method of atomizing capture liquid was used to capture and encapsulate the radioactive aerosol. The result of the engineering test indicated that reducing the capture liquid's surface tension can decrease the atomized droplet's particle diameter. That benefits the aerosol particle capturing. The higher viscosity contributes to encapsulate the loose contamination. On the decommissioning site, the selected capturing liquid in engineering test was effective in capturing the high concentration  $\alpha$ radioactive aerosol and encapsulating the loose contamination. The encapsulating effort could prevent the loose contamination from resuspension for several days.

**Key words:** decommission; plasma cutting; radioactive aerosol; atomizing