

· 综 述 ·

氡防护体系动态介绍与评述

郭秋菊¹, 张 磊²

(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. 军事科学院防化研究院, 北京 102205)

摘 要:2009 年世界卫生组织颁布的氡暴露流行病学研究最新结果表明, 氡暴露是导致公众肺癌发生的第二大因素, 3%~14% 肺癌患者可归因于室内氡暴露, 低、中水平室内氡浓度也可导致肺癌危险提高, 其超额绝对危险较之前的评价结果有了大幅度提高。之后国际放射防护委员会(ICRP)相继发表了一系列旨在降低公众及工作人员氡暴露危险的氡防护相关出版物, 在防护监管原则、氡浓度参考水平、剂量转换系数等方面均做出了较大变更。本文就 ICRP 近年来有关氡防护内容的主要变更进行了梳理介绍, 围绕 ICRP 推荐的新剂量转换系数, 简介评述了联合国原子辐射影响科学委员会(UNSCEAR)及国际原子能机构(IAEA)的立场和观点, 希冀为国内同行提供参考。

关键词: 氡暴露; ICRP; UNSCEAR; IAEA; 剂量转换系数

中图分类号: X82

文献标识码: A

铀系衰变链中的氡(²²²Rn)及其短寿命子体是公众所受天然本底辐射中剂量最大的贡献者, 同时也是铀矿山及某些天然存在的放射性物质即 NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) 相关设施辐射防护和辐射环境监测关注的对象。早在上世纪初期, 在铀矿工和矿工人群中就已证实高浓度氡暴露可以导致肺癌发病率增高, 因此早期针对氡流行病学调查和相关辐射防护法规主要是针对铀矿和矿工人群开展的, 1986 年国际放射防护委员会(International Committee of Radiological Protection, ICRP)出版了关于铀矿工和矿工氡防护的第 47 号出版物《矿山工作人员的辐射防护》^[1]。对涉及一般公众的居室环境中氡暴露的关注始于上世纪后期, 包括我国在内的很多国家开展了室内氡浓度水平测量调查, 并参照 1997 年 ICRP 第 65 号出版物《住宅和工作场所氡-222 的防护》^[2] 内容, 制定了居室和工作场所氡浓度控制限值, 针对公众的氡流行病学调查也得到了广泛开展。

与其他放射性核素所致辐射的防护相比, 氡暴露在辐射防护体系中一直被单独对待, ICRP 关于“以单独的方式处理氡暴露”问题给出的解释理由是“氡有特殊的剂量学问题和流行病学问题”。

氡的照射途径与其他天然源的照射途径不同, 以示区别通常称之为氡暴露(radon exposure), 并单独给氡暴露一个年有效剂量限值, 即 10 mSv/a^[2], 可见氡暴露有其显著的独特性。至上个世纪末, 在辐射防护框架体系内, 已经建立了相对完善的针对住宅和工作场所氡防护的法规体系。国际放射防护委员会(ICRP)第 65 号出版物《住宅和工作场所氡-222 的防护》^[2], 以及国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)安全丛书 115 号^[3] 针对氡暴露防护的实施, 分别从不同的角度提出了氡防护的建议和规定, 是氡防护体系的重要基石。

我国现行国标《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)^[4] 中氡防护相关条款内容的参考依据是 ICRP 60 号出版物《国际放射防护委员会 1990 年建议书》^[5] 和 ICRP 第 65 号出版物《住宅和工作场所氡-222 的防护》以及 IAEA 的 BSS-115 中相关内容, 表 1 是 GB 18871—2002 中氡防护相关规定的主要内容, 其中, 氡浓度控制的上限值并没有采用 ICRP 第 65 号出版物针对住宅和工作场所的推荐值 600 Bq·m⁻³ 和 1 500 Bq·m⁻³, 而是采用的 IAEA BSS-115 中的规定值。

收稿日期: 2021-09-23

作者简介: 郭秋菊(1963—), 女, 1986 年本科毕业于原白求恩医科大学放射医学专业, 1989 年硕士毕业于中国医学科学院放射医学研究所, 1993 年博士毕业于日本名古屋大学原子力工学专业, 教授。E-mail: qjguo@pku.edu.cn

表 1 氡持续照射情况下的行动水平 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
(GB 18871—2002)

Tab. 1 Action level of radon concentration for prolonged radon exposure ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) (GB 18871—2002)

场 所	行动水平下限值	行动水平上限值
住宅 (年平均值)	200 待建住宅	400 已建住宅
工作场所 (年平均值)	500	1000
相应行动	宜考虑采取补救行动	应采取补救行动

在《国际放射防护委员会 1990 年建议书》中,氡暴露的“照射情况”分类属于“持续照射”(prolonged exposure),并规定氡暴露年有效剂量范围为 3~10 mSv,建议针对职业照射和公众照射采用氡浓度的“行动水平”控制氡暴露。在《国际放射防护委员会 2007 年建议书》^[6]中,“照射情况”分类有了重大变更,将氡暴露归类为“现存照射”(existing exposure),并针对“现存照射”,提出采用“参考水平”进行氡暴露辐射防护监管,“委员会期望监管机构以一种通用的方法应用最优化原则,使氡暴露处于一个更低的剂量水平”,这句话明确地表述了“行动水平”与“参考水平”的本质区别。在氡暴露剂量控制限值上,《国际放射防护委员会 2007 年建议书》与之前的出版物保持了一致,继续采用 3~10 mSv 的年有效剂量限值,其对应的住宅和工作场所的参考水平分别是 200~600 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 500~1 500 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由此可见,从 1993 年到 2007 年的较长时间里,围绕氡防护问题,ICRP 除了提出“采用最优化原则和应用参考水平”这样的原则性变更外,在年有效剂量限值(或约束值)和氡浓度行动水平(或参考水平)的数值上并没有发生变化。

如前所述,由于“氡暴露有特殊的剂量学问题和流行病学问题”,用于剂量评价的核心参数,即由暴露量换算成有效剂量的剂量转换系数(dose conversion factor, DCF)的估算模式也一直存在有二种途径:即流行病学估算模式和剂量学估算模式。联合国原子辐射影响科学委员会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)一直采用的是剂量学估算模式,即根据呼吸道模型和核素生物动力学模型进行估算。而 ICRP 在其 65 号出版物中曾明确表示:应“采用剂量转换约定把有效剂量换算成氡浓

度值”,推荐的是流行病学评估模式。所谓“剂量转换约定”(dose conversion conventions)是根据同等危害将用工作水平月(Working Level Month, WLM)表示的氡子体暴露量与用 mSv 表示的有效剂量关联起来的方法,其依据的是相同剂量危害相等,对辐射危险进行定量估算的依据则来自以日本原子弹爆炸幸存者为主要研究对象的流行病学调查结果。显然,这是二种科学途径不同的估算模式。ICRP 在其 2007 年建议书中再次明确指出“应采用剂量转换约定把有效剂量换算成氡-222 浓度值”,坚持的依然是流行病学估算模式。

本文在前述的氡暴露防护相关发展背景下,首先简介世界卫生组织(World Health Organization, WHO)2009 年发表的《WHO 室内氡手册》^[7]中关于氡暴露危害的主要结论,之后依据时间顺序,对近 10 年来 ICRP 关于氡防护问题发表的重要变化进行梳理和分析,在此基础上对 UNSCEAR 和 IAEA 这两个重要国际组织针对 ICRP 给出的新的剂量转换系数做出的相关回应进行介绍和评述,希冀对氡防护相关领域的国内同行提供参考。

1 氡暴露的健康危害——WHO 室内氡手册^[7]

人类辐射致癌危险评价是制定辐射防护剂量限值的重要生物学基础。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)一直积极关注环境因素对人类健康的影响,关注室内氡暴露的流行病学进展。早在 1988 年其下属组织国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)就明确指出:氡暴露是可原发性导致肺癌的物理诱因,并在世界范围内积极评价住宅氡暴露导致的全球疾病负担(Global Burden of Disease, GBD)。2009 年底颁布的《WHO 室内氡手册》,不仅是由该组织主持实施的国际氡项目(International Radon Project)的结题报告^[8],更是对近 30 年来世界多国开展的室内氡暴露与公众健康流行病学病例对照研究的重要总结。其中关于氡暴露健康危险的主要结论包括:1)氡暴露是仅次于吸烟的第二大致公众肺癌诱因,贡献率占肺癌患者的 3%~14%;2)肺癌发病率与室内氡浓度成正比,肺癌患者的绝大部分是低、中浓度水平

氡暴露所致,没有发现存在阈值;3)建议将室内氡浓度参考水平设置在 $100 \sim 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,并倡导提出了旨在降低氡致公众肺癌危险的国家氡行动计划(National Radon Action Plan)。

2 氡暴露防护原则、参考水平与剂量转换系数——近期 ICRP 氡防护相关出版物

2.1 ICRP 第 115 号出版物《氡及其子体的肺癌危险与关于氡的声明》^[9]

2009 年《WHO 室内氡手册》的颁布,在氡相关辐射防护领域如同一石激起波澜,或许这是 ICRP 氡防护相关一系列重大改变的重要背景和契机^[10]。《WHO 室内氡手册》一问世,很快 ICRP 就颁布了第 115 号出版物《氡及其子体的肺癌危险与关于氡的声明》。在这份声明中,ICRP 做出了几点重要变更:1)通过对氡暴露危险的重新评价,其超额绝对危险为 $5 \times 10^{-4}/\text{WLM}$,即每工作水平月暴露情况下每万人中 5 人罹患肺癌。此数值比 ICRP 第 65 号出版物中以矿工为主要调查人群的流行病学结果给出的危险系数升高近 2 倍($2.8 \times 10^{-4}/\text{WLM}$),而与 UNSCEAR 2009 年报告书中给出的数值更加接近。2)关于氡暴露剂量转换系数 *DCF* 估算,ICRP 明确指出:应该同其他放射性核素一样,采用剂量学估算模式,并依据不同环境中氡子体特征参数计算典型场所的剂量转换系数。至此,ICRP 放弃了多年来坚持的流行病学评价模式,转向和 UNSCEAR 一样推荐采用剂量学模式来评估氡暴露剂量,同时,第 115 号出版物还提示:*DCF* 数值有可能要增加一倍。3)接受 WHO 建议,对于居室,将参考水平上限值从 2007 年建议书中的 $600 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 降至 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$;并指出其对应的有效剂量依然是每年 10 mSv 。对于工作场所,设定 $1000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 是对氡暴露现存照射实施职业照射管理的进入水平(entry point),取代了 ICRP 第 65 号出版物和 ICRP 2007 年建议书中建议的工作场所控制上限值 $1500 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可以说,出现在 ICRP 第 115 号出版物中的上述变化来得突然,影响重大。

2.2 ICRP 第 126 号出版物《氡暴露的辐射防护》^[11]

关于氡暴露的防护,ICRP 随后做出了系统和

全面的更新,这就是委员会于 2014 年颁布的题为《氡暴露的辐射防护》的第 126 号出版物。ICRP 声明此出版物取代该组织 1993 年出版的《住宅和工作场所氡-222 的防护》的第 65 号出版物。这是历经 20 余年之后,委员会针对氡暴露防护推出的新历史阶段的全面阐述,表明了第 126 号出版物的核心位置和重要性。

ICRP 第 126 号出版物延续并集合了上述介绍的《ICRP 2007 年建议书》和 ICRP 第 115 号出版物《氡及其子体的肺癌危险与关于氡的声明》中的基本观点,《氡暴露的辐射防护》中的重大变更主要包括:1)建筑物分类原则:不再依据使用目的对建筑物进行分类,将所有室内环境统一称之为建筑(buildings)。不再区分“工作场所”和“居室”,可以理解为不再区分车间厂房、办公室、学校还是医院或图书馆等公共场所,不再区分地下空间和地面建筑,有人员停留的所有室内环境中的氡暴露防护监测与控制均纳入同一体系。的确,现实情况是很多大型建筑物是具有多功能的综合建筑体,同一建筑物内会存在诸多使用目的不同的部分或区域,可能既是住宅又是办公室,同时还是学校或医院等,从管理角度看,不再区分工作场所和居室的统一管理原则,可以带来管理程序和操作上的简化,提高效率又节约管理成本;2)采用分级管理原则(graded approach)。“分级管理”有三个层次步骤:a)开展氡浓度测量,确定建筑物内氡浓度在参考水平($100 \sim 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)范围内,通过实施最优化原则,实现可合理做到的低水平;这里可以阐述为:无论是工作场所还是住宅,首先要开展氡浓度测量,确认氡浓度没有超过参考水平,继而再实施防护的最优化;需要强调的是:对于居室,要采取一切可能的措施,确保氡浓度不得超过参考水平;b)对于工作场所,当氡浓度大于 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,需要通过各种途径的努力,例如改善通风条件或减少居留时间等措施,之后进行暴露剂量评价,以确保氡暴露剂量小于 $10 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 的参考水平上限;c)当无论采取什么措施,该工作场所的年有效剂量还是有可能大于 10 mSv 时,则应纳入职业辐射照射管理体系进行监管。针对某些特殊工作场所,如铀矿山、部分矿山以及高氡温泉利用或水处理设施等场所,则需要进行氡暴露剂量评价,以确保辐射安全。

从辐射防护监管的角度,无论是针对公众还是工作人员,其分级管理的第一步都是以氡浓度参考水平为标准实施的,也就是说管理评价指标都仅针对氡浓度,所以通常情况下测量氡气浓度就应该满足监管需求。对于工作人员,只有需要进行不同照射情况下的剂量比较,或对工作场所最优化措施进行效果评价时,才需要评价有效剂量,这时则需要监测氡子体浓度,并使用剂量转换系数 DCF 进行估算。在《氡照射的放射防护》中,ICRP 并没有给出重要且敏感的剂量转换系数数值,因为其之前的报告中已经明确指出,氡暴露 DCF 也应该与其他放射性核素导致的内照射剂量的估算模式一样,通过剂量学模式计算导出,即通过呼吸系统模型和生物动力学模型计算给出。所以,我们期待并关注的 DCF 出现在了 ICRP 第 137 号报告《放射性核素的职业摄入:Part 3》中^[12]。

在第 126 号出版物中,ICRP 针对国家监管机构,正式提出了国家氡行动计划建议,明确规定了国家氡行动计划的目标、框架内容和基本要求,在此不再赘述。

2.3 剂量转换系数——ICRP 137 号出版物第 3 部分^[12]

通过前面介绍我们知道,无论是居室还是工作场所,大多数情况下,通过氡浓度监测控制就可以满足氡防护管理要求,但在工作场所,当氡暴露被归类为“计划照射情况”时、或氡浓度大于参考水平时、或需要与其他照射情况进行剂量比较时、或需要对最优化措施进行评价等情景下,则需要对氡暴露导致的内照射剂量进行估算评价。

内照射剂量估算的核心参数是构建摄入量和有效剂量之间转换关系的剂量转换系数,对氡则是暴露量 ($Bq \cdot h \cdot m^{-3}$) 与有效剂量之间的剂量转换系数 DCF 。表 2 列出了在 ICRP 第 137 号出版物《放射性核素的职业摄入:Part 3》出版之前 UNSCEAR 和 ICRP 给出的推荐值。

表 2 中 UNSCEAR 1993 年起在其报告中给出的剂量转换系数 $9 \text{ nSv}/(Bq \cdot h \cdot m^{-3})$ 应该是至今为止最被广泛应用的数值。需要在此澄清的是,这里的 $Bq \cdot m^{-3}$ 是平衡当量氡浓度 (Equilibrium Equivalent Concentration of Radon, EEC),是氡子体浓度,因此剂量转换系数对应的是平衡当量氡浓度的暴露量。 $EEC = C_{\text{氡浓度}} \times f$, f 是平衡因子,对

表 2 UNSCEAR 和 ICRP 剂量转换系数
推荐值 [$\text{nSv}/(Bq \cdot h \cdot m^{-3})$]

Tab. 2 The recommended DCF by ICRP and
UNSCEAR [$\text{nSv}/(Bq \cdot h \cdot m^{-3})$]

推荐组织		1982	1988	1993、2000、2006
UNSCEAR	室内	8.7	10	9
	室外	17	10	9
ICRP 65 号 出版物	工作场所	8		
	居室	6		

于室内环境,GB 18871 的推荐值是 0.4。前面参考水平的 $Bq \cdot m^{-3}$ 则是氡气的活度浓度,二者虽然单位相同,但有本质区别,不可混淆。

ICRP 第 137 号出版物是为估算职业人员内照射剂量给出的最新版本的放射性核素剂量转换系数,有关氡及氡子体的相关内容包含在第三分册中。由于 DCF 是采用剂量学模式计算导出的,第三分册中列出了计算所需要的氡子体物理特征参数,包括未结合态份额 f_p 、气溶胶粒径分布空气动力学活度中位径 ($AMAD$) 和几何偏差 (GSD)、氡子体活度浓度比值、呼吸率、颗粒物密度及几何因子等,如果能够获得这些参数,则建议计算特定环境中的 DCF 用于氡暴露剂量评价。在没有这些氡子体参数时,ICRP 第 137 号出版物推荐了可应用于不同工作场所和工作状态下的 DCF ,见表 3。

可以看到,正如委员会在第 115 号出版物中预言的那样,表 3 中 $DCF = 17 \text{ nSv}/(Bq \cdot h \cdot m^{-3})$ 比至今常用的 $DCF = 9 \text{ nSv}/(Bq \cdot h \cdot m^{-3})$ 提高了近 2 倍。表 3 中把旅游岩洞 (tourist caves) 单独列出的原因是因为在岩洞这种特殊环境中,氡子体气溶胶相关物理特征参数会显著有别于其他环境。对于体力劳动状态,则是呼吸率明显不同。ICRP 第 137 号出版物虽然是针对职业照射的,但委员会指出这里的建筑物内和地下矿山给出的 DCF 数值几乎适用于所有场所。那么今后针对公众的氡

表 3 ICRP 第 137 出版物推荐的氡子体
暴露剂量转换系数 DCF

Tab. 3 DCF recommended by
ICRP Publication No. 137

场所	建筑内和 地下矿山	旅游岩洞和工作场所 重体力劳动
$DCF(\text{mSv}/\text{WLM})$	10	20
$DCF[\text{mSv}/(\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})]$	3	6
$DCF[\text{nSv}/(Bq \cdot h \cdot \text{m}^{-3})]$	17	34

暴露估算的剂量转换系数将做出如何规定,值得关注。

3 UNSCEAR 针对新剂量转换系数的观点

联合国原子辐射影响科学委员会 (UNSCEAR) 从 1980 年代起对氡暴露健康危险进行阶段性综述评价并给出剂量转换系数,该组织于 1993 年报告书中给出的剂量转换系数 $9 \text{ nSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$ 一直被广泛采用。UNSCEAR 在其 2006 年出版的关于氡暴露危险评价的报告书中给出的 *DCF* 依然与 1993 年报告书上的数值一致^[13]。ICRP 第 137 号出版物给出新的剂量转换系数推荐值后,UNSCEAR 表示了高度关注,并在 2019 年第 66 次大会上专门进行了讨论,并做出了回应^[14]。

关于 ICRP 推荐的新剂量转换系数,UNSCEAR 做出的主要概括和结论如下:1)如果是用于辐射防护目的,该值应由其他相关国际组织给出。2)如果是为了与其他辐射源照射进行比较,则该值的给出是 UNSCEAR 的职责。3)近期采用剂量学模式进行了再综述和估算。居室环境结果:数学均值为 $18 \text{ nSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$ 、几何均值为 $16 \text{ nSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$ 、范围是 $(7 \sim 34) \text{ nSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$ 。4)对 2006 年以来发表的氡暴露流行病学研究结果进行综述的结果,对于居室:超额相对危险均值为 $1.21/100 \text{ WLM}$;矿工流行病学队列研究 $(0.16 \sim 1.53)/100 \text{ WLM}$ 。由于暴露条件不同,公众与矿工的肺癌危险并不相同。5)虽然针对剂量学模式和流行病学模式至今已经开展了大量研究工作,但结果的不确定度依然很大。剂量学模型的不确定度主要来源于输入参数的不确定度和模型假设条件的不确定度,包括一些过程的过度简化;无论是居室还是矿山的流行病学研究,其不确定度均主要来源于氡暴露剂量估算的不确定度;由于 ^{220}Rn 对氡测量影响,居室流行病学研究给出的超额相对危险似乎被低估了 $50\% \sim 100\%$ 。

在对上述结果进行了说明阐述之后,UNSCEAR 给出了最后的结论:鉴于目前估算 *DCF* 的这二种模式均存在较大的不确定度,以及考虑到再评价结果与之前 UNSCEAR 给出的数值并无显著差异,委员会推荐继续使用 $9 \text{ nSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$,目前尚没有足够证据去更改。

4 IAEA 针对新剂量转换系数的动态

国际原子能机构 (IAEA) 在其基本安全丛书 BSS 中涵盖有针对氡暴露的防护规定。在该组织 2014 年颁布的《Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3》(简称 GSR Part 3)^[15]中规定的参考水平是居室环境为 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 、工作场所为 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在 ICRP 推荐的新剂量转换系数提高为原来的 2 倍背景下,IAEA 于 2019 年 10 月在维也纳专门召开了由多个相关国际组织和成员国代表参加的名称为“IAEA technical meeting on the implications of the new dose conversion factors for radon”的技术咨询会议^[16]。IAEA 关注的核心是目前规定的参考水平、特别是工作场所参考水平 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 是否应该变更,以及是否应该采用 ICRP 推荐的新剂量转换系数估算剂量。现状是包括欧盟在内的多个国家已经相继修改了本国的相关标准或导则,把工作场所参考水平从原来的 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低到了 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 或 $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,但依然有多个成员国表示暂时不考虑修改。顺便提及一下,欧盟一直积极跟随 ICRP 在氡防护原则上的变更,针对工作场所,目前欧盟防护标准规定:氡浓度参考水平为 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,首先进行现场实际测量,判断是否低于参考水平;如果高于参考水平,则要开展剂量评价,其年有效剂量参考水平是 6 mSv ;如果氡暴露剂量高于 6 mSv 则纳入“计划照射情况”开展辐射安全管理。

显然对于部分 IAEA 成员国,在铀矿山或矿山等工作场所,将参考水平从 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低到 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 会涉及到具体操作困难和成本的增加,如果进一步再采用新剂量转换系数估算评价氡暴露剂量,会提高人力成本,因此对 IAEA 来说,成员国之间的协商和同意非常重要。这个咨询性质的技术会议之后,ICRP 和 UNSCEAR 联合发表了情况说明 (information note)^[16],除了再次表述了各自的观点之外,也给出了这次会议围绕 GSR Part 3 内容达成的共识,即:1)目前没有必要立即修改 GSR Part 3 中规定的参考水平 (居室环境为 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 、工作场所为 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)。2)对所有情况下 (居室、工作场所及计划照射情况) 的氡暴露剂量估算采用 ICRP 推荐的新转换系数。

5 结束语

通过上述回顾可以看出,首先,围绕氡暴露危险系数,UNSCEAR、WHO 和 ICRP 认识是一致的,是达成共识的;其次,ICRP 关于氡暴露防护的最优化和分级管理原则的建议,在 IAEA 2014 年公布的 BSS-GSR-Part 3 中既已得到采纳和体现,只是目前在工作场所氡浓度参考水平设置上存在差异,分别是 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。鉴于包括欧盟在内的多个成员国目前在相关国家标准中已经修改了此值,将 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 降为 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,甚至有的国家已经降至和公众防护参考水平一样,为 $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,可以预计,IAEA 对工作场所参考水平的修改或许仅仅是时间问题。

关于剂量转换系数,从上面介绍可以看出 ICRP 推荐的新数值与 UNSCEAR 最新综述的结果是吻合的,但是鉴于无论是采用流行病学评价模式还是剂量学评价模式,目前均存在难以克服的较大的不确定度,因此 UNSCEAR 认为没有足够的科学依据进行变更。ICRP 从辐射防护的立场出发推荐了数值翻倍的新剂量转换系数,IAEA 从监管角度表示采用 ICRP 推荐的新数值进行氡暴露剂量估算。由此可能伴随的主要问题是采用新 DCF 计算得到氡暴露有效剂量有增加。例如:采用新 DCF 计算参考水平上限值(居室 $300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和工作场所 $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)对应的年有效剂量为

$13 \sim 14 \text{ mSv}$ 。再举一例,依据近年调查结果,取我国室内氡浓度年均值为 $40 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[17],采用新剂量转换系数计算,则公众氡暴露年有效剂量约为 1.9 mSv [$40 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \times 0.4 \times 7\,000 \text{ h} \times 17 \text{ nSv}/(\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$],会带来天然辐射总剂量的提高。为此,IAEA 成员国也期待 IAEA 早日给出新 DCF 的使用导则。ICRP 第 137 号系列报告《放射性核素的职业摄入》预计近期全套出版完毕,届时很多国家应该会考虑和氡的新 DCF 一起纳入有关监管规定或标准中。

我国近 10 年来由不同的几个相关国家行政部门颁布了数个氡相关的国家标准,既有针对一般居室公众照射的,也有针对铀矿冶等工作场所职业照射的,各标准彼此之间设置的参考水平不尽一致,这是较突出的问题。除此之外,ICRP 建议和 IAEA 规定的氡防护分级管理原则似乎也没有得到很好体现。期待这些问题能够在今后基本安全标准 GB 18871 的修订中得到体现、统一和完善。

如 UNSCEAR 指出的那样,环境空气中²²⁰Rn 对氡测量影响是导致氡暴露剂量估算不确定性的主要因素,今后开展²²⁰Rn 及子体测量、环境行为和²²⁰Rn 子体 DCF 相关研究的重要性日益凸显。同时,为减小氡剂量估算的不确定度,开展我国典型环境中氡子体特征物理参数的现场测量有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] International Committee of Radiological Protection. Radiation protection of workers in mines[R]. ICRP Publication 47. ICRP, 1986.
- [2] 国际放射防护委员会. 住宅和工作场所氡-222 的防护[M]. ICRP 第 65 号出版物. 李素云,译. 北京:原子能出版社,1997.
International Committee of Radiological Protection. Protection against radon-222 at home and work[M]. ICRP Publication 65. 1997.
- [3] 国际原子能机构. 国际电离辐射防护和辐射源安全的基本安全标准[M]. 安全丛书 No. 115. 维也纳:国际原子能机构,1996.
International Atomic Energy Agency. Basic safety standard for protection against ionizing radiation and radiation sources [M]. BSS Series No. 115. Vienna, 1996.
- [4] 核工业标准化研究所. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准;GB 8871—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [5] 国际放射防护委员会. 国际放射防护委员会 1990 建议书[M]. ICRP 第 60 号出版物. 李德平,等译. 北京:原子能出版社,1993.
- [6] 国际放射防护委员会. 国际放射防护委员会 2007 建议书[M]. ICRP 第 103 号出版物. 潘自强,等译. 北京:原子能出版社,2008.
International Committee of Radiological Protection. ICRP Recommendation 2007 [R]. ICRP Publication 103.

ICRP, 2008.

- [7] World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective [M]. World Health Organization, France, 2009.
- [8] World Health Organization. International radon project survey on radon guidelines, programmes and activities [M]. WHO, Geneva. 2007.
- [9] International Committee of Radiological Protection. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon [M]. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1). 2010.
- [10] Ludovic Vaillant and C'eline Bataille. Management of radon: a review of ICRP recommendations [J]. J Radiol Prot, 2012, 32: R1-R12.
- [11] International Committee of Radiological Protection. Radiological protection against radon exposure [R]. ICRP Publication 126. 2014.
- [12] International Committee of Radiological Protection. Occupational intakes of radionuclides: Part 3 [R]. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4), 2017.
- [13] United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2006 report to the general assembly, with scientific annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces [R]. UN, 2006.
- [14] United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2019 report to the general assembly, with scientific annex B: Lung cancer from exposure to radon [R]. United Nations, 2019.
- [15] International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards [R]. General safety requirements part 3 (GSR Part 3). 2014.
- [16] ICRP & UNSCEAR. Information note for participants at the IAEA technical meeting on the implications of the new dose conversion factors for radon, 1-4 Oct 2019 [Z]. 2020.
- [17] 潘自强 刘森林. 中国辐射水平 [M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
PAN Ziqiang, LIU Senlin. Radiation level in China [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010.

Introduction and review on the status of protection system against radon exposure

GUO Qiuju¹, ZHANG Lei²

(1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

2. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205)

Abstract: The World Health Organization (WHO) published “Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective” in 2009 after its review on epidemiological studies of lung cancer and radon exposure. WHO concluded that most radon-induced lung cancers occur from low and medium dose exposures in residents’ home. Radon is the second cause of lung cancer after smoking, and a relative higher risk is showing. After that, International Committee on Radiological Protection (ICRP) published several publications related to the protection against radon exposure. Great changes on reference level of indoor radon concentration, protection strategy and dose conversion factor were recommended. This paper introduces these changes and their related background, focusing on dose conversion factor. The viewpoint of UNSCRAR and IAEA are also introduced and discussed.

Key words: radon exposure; ICRP; UNSCEAR; IAEA; dose conversion factor