

国际原子能机构安全标准

保护人类与环境

保护公众免受氡和其他 天然辐射源所致室内照射

由下列组织共同倡议编写：国际原子能机构、世界卫生组织



IAEA



WHO

特定安全导则

第 SSG-32 号



IAEA

国际原子能机构

国际原子能机构安全标准和相关出版物

国际原子能机构安全标准

根据《国际原子能机构规约》第三条的规定，国际原子能机构受权制定或采取旨在保护健康及尽量减少对生命与财产之危险的安全标准，并规定适用这些标准。

国际原子能机构借以制定标准的出版物以国际原子能机构《安全标准丛书》的形式印发。该丛书涵盖核安全、辐射安全、运输安全和废物安全。该丛书出版物的分类是安全基本法则、安全要求和安全导则。

有关国际原子能机构安全标准计划的资料可访问以下国际原子能机构因特网网站：

www.iaea.org/zh/shu-ju-ku/an-quan-biao-zhun

该网站提供已出版安全标准和安全标准草案的英文文本。以阿拉伯文、中文、法文、俄文和西班牙文印发的安全标准文本；国际原子能机构安全术语以及正在制订中的安全标准状况报告也在该网站提供使用。欲求进一步的信息，请与国际原子能机构联系（Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria）。

敬请国际原子能机构安全标准的所有用户将使用这些安全标准的经验（例如作为国家监管、安全评审和培训班课程的依据）通知国际原子能机构，以确保这些安全标准继续满足用户需求。资料可以通过国际原子能机构因特网网站提供或按上述地址邮寄或通过电子邮件发至 Official.Mail@iaea.org。

相关出版物

国际原子能机构规定适用这些标准，并按照《国际原子能机构规约》第三条和第八条 C 款之规定，提供和促进有关和平核活动的信息交流并为此目的充任成员国的居间人。

核活动的安全报告以《安全报告》的形式印发，《安全报告》提供能够用以支持安全标准的实例和详细方法。

国际原子能机构其他安全相关出版物以《应急准备和响应》出版物、《放射学评定报告》、国际核安全组的《核安全组报告》、《技术报告》和《技术文件》的形式印发。国际原子能机构还印发放射性事故报告、培训手册和实用手册以及其他特别安全相关出版物。

安保相关出版物以国际原子能机构《核安保丛书》的形式印发。

国际原子能机构《核能丛书》由旨在鼓励和援助和平利用原子能的研究、发展和实际应用的资料性出版物组成。它包括关于核电、核燃料循环、放射性废物管理和退役领域技术状况和进展以及经验、良好实践和实例的报告和导则。

保护公众免受氡和其他天然 辐射源所致室内照射

国际原子能机构的《规约》于 1956 年 10 月 23 日经在纽约联合国总部举行的原子能机构《规约》会议核准，并于 1957 年 7 月 29 日生效。原子能机构总部设在维也纳，其主要目标是“加速和扩大原子能对全世界和平、健康及繁荣的贡献”。

国际原子能机构《安全标准丛书》第 SSG-32 号

保护公众免受氡和其他天然 辐射源所致室内照射

特定安全导则

由下列组织共同倡议编写：
国际原子能机构、世界卫生组织

国际原子能机构
2023 年·维也纳

版权说明

国际原子能机构的所有科学和技术出版物均受 1952 年（伯尔尼）通过并于 1972 年（巴黎）修订的《世界版权公约》之条款的保护。自那时以来，世界知识产权组织（日内瓦）已将版权的范围扩大到包括电子形式和虚拟形式的知识产权。必须获得许可而且通常需要签订版税协议方能使用国际原子能机构印刷形式或电子形式出版物中所载全部或部分内容。欢迎有关非商业性翻印和翻译的建议并将在个案基础上予以考虑。垂询应按以下地址发至国际原子能机构出版处：

Marketing and Sales Unit,
Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
传真：+43 1 2600 22529
电话：+43 1 2600 22417
电子信箱：sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/zh/chu-ban-wu>

© 国际原子能机构，2023 年
国际原子能机构印刷
2023 年 10 月·奥地利

保护公众免受氡和其他天然辐射源所致室内照射

国际原子能机构，奥地利，2023 年 10 月
STI/PUB/1651
ISBN 978-92-0-501323-7（简装书：碱性纸）
ISSN 1020-5853

前 言

国际原子能机构（原子能机构）《规约》授权原子能机构“制定或采取旨在保护健康及尽量减少对生命与财产的危险的安全标准”。这些标准是原子能机构在其本身的工作中必须使用而且各国通过其对核安全和辐射安全的监管规定能够适用的标准。原子能机构与联合国主管机关及有关专门机构协商进行这一工作。定期得到审查的一整套高质量标准是稳定和可持续的全球安全制度的一个关键要素，而原子能机构在这些标准的适用方面提供的援助亦是如此。

原子能机构于1958年开始实施安全标准计划。对质量、目的适宜性和持续改进的强调导致原子能机构标准在世界范围内得到了广泛使用。《安全标准丛书》现包括统一的《基本安全原则》。《基本安全原则》代表着国际上对于高水平防护和安全必须由哪些要素构成所形成的共识。在安全标准委员会的大力支持下，原子能机构正在努力促进全球对其标准的认可和使用。

标准只有在实践中加以适当应用才能有效。原子能机构的安全服务涵盖设计安全、选址安全、工程安全、运行安全、辐射安全、放射性物质的安全运输和放射性废物的安全管理以及政府组织、监管事项和组织中的安全文化。这些安全服务有助于成员国适用这些标准，并有助于共享宝贵经验和真知灼见。

监管安全是一项国家责任。目前，许多国家已经决定采用原子能机构的标准，以便在其国家规章中使用。对各种国际安全公约缔约国而言，原子能机构的标准提供了确保有效履行这些公约所规定之义务的一致和可靠的手段。世界各地的监管机构和营运者也适用这些标准，以加强核电生产领域的安全以及医学、工业、农业和研究领域核应用的安全。

安全本身不是目的，而是当前和今后实现保护所有国家的人民和环境的目标的一个先决条件。必须评定和控制与电离辐射相关的危险，同时杜绝不当限制核能对公平和可持续发展的贡献。世界各国政府、监管机构和营运者都必须确保有益、安全和合乎道德地利用核材料和辐射源。原子能机构的安全标准即旨在促进实现这一要求，因此，我鼓励所有成员国都采用这些标准。

序 言

原子能机构《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》（原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号）确立了保护人们免受电离辐射照射有害后果、辐射源安全和保护环境的要求。《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号由欧洲委员会、联合国粮食及农业组织（FAO）、国际原子能机构（IAEA）、国际劳工组织（ILO）、经合组织核能机构（OECD/NEA）、泛美卫生组织（PAHO）、联合国环境规划署（UNEP）和世界卫生组织（WHO）联合发起。

本“安全导则”提供了关于满足 GSR Part 3 要求的建议和指导，以保护公众免受室内自然电离辐射源的照射。在考虑控制室内天然辐射源（如建筑材料中的氡气和天然放射性核素）时，为国家主管部门采用正当性和最优化防护的要求提供了建议和指导。此外，还就各国制定国家氡行动计划提供了建议和指导控制室内公众氡照射。

本“安全导则”由原子能机构和世界卫生组织联合发起。原子能机构非常感谢几个国家和世界卫生组织的专家对起草和审订案文所作的贡献。

国际原子能机构安全标准

背景

放射性是一种自然现象，因而天然辐射源的存在是环境的特征。辐射和放射性物质具有许多有益的用途，从发电到医学、工业和农业应用不一而足。必须就这些应用可能对工作人员、公众和环境造成的辐射危险进行评定，并在必要时加以控制。

因此，辐射的医学应用、核装置的运行、放射性物质的生产、运输和使用以及放射性废物的管理等活动都必须服从安全标准的约束。

对安全实施监管是国家的一项责任。然而，辐射危险有可能超越国界，因此，国际合作的目的就是通过交流经验和提高控制危险、预防事故、应对紧急情况和减缓任何有害后果的能力来促进和加强全球安全。

各国负有勤勉管理义务和谨慎行事责任，而且理应履行其各自的国家和国际承诺与义务。

国际安全标准为各国履行一般国际法原则规定的义务例如与环境保护有关的义务提供支持。国际安全标准还促进和确保对安全建立信心，并为国际商业与贸易提供便利。

全球核安全制度已经建立，并且正在不断地加以改进。对实施有约束力的国际文书和国家安全基础结构提供支撑的原子能机构安全标准是这一全球性制度的一座基石。原子能机构安全标准是缔约国根据这些国际公约评价各缔约国履约情况的一个有用工具。

原子能机构安全标准

原子能机构安全标准的地位源于原子能机构《规约》，其中授权原子能机构与联合国主管机关及有关专门机构协商并在适当领域与之合作，以制定或采取旨在保护健康及尽量减少对生命与财产之危险的安全标准，并对其适用作出规定。

为了确保保护人类和环境免受电离辐射的有害影响，原子能机构安全标准制定了基本安全原则、安全要求和安全措施，以控制对人类的辐射照射和放射性物质向环境的释放，限制可能导致核反应堆堆芯、核链式反应、辐射源或任何其他辐射源失控的事件发生的可能性，并在发生这类事件时减轻其后果。这些标准适用于引起辐射危险的设施和活动，其中包括核装置、辐射和辐射源利用、放射性物质运输和放射性废物管理。

安全措施和安保措施¹具有保护生命和健康以及保护环境的目的。安全措施和安保措施的制订和执行必须统筹兼顾，以便安保措施不损害安全，以及安全措施不损害安保。

原子能机构安全标准反映了有关保护人类和环境免受电离辐射有害影响的高水平安全在构成要素方面的国际共识。这些安全标准以原子能机构《安全标准丛书》的形式印发，该丛书分以下三类（见图1）。



图1. 国际原子能机构《安全标准丛书》的长期结构。

¹ 另见以原子能机构《核安保丛书》印发的出版物。

安全基本法则

“安全基本法则”阐述防护和安全的基本安全目标和原则，以及为安全要求提供依据。

安全要求

一套统筹兼顾和协调一致的“安全要求”确定为确保现在和将来保护人类与环境所必须满足的各项要求。这些要求遵循“安全基本法则”提出的目标和原则。如果不能满足这些要求，则必须采取措施以达到或恢复所要求的安全水平。这些要求的格式和类型便于其用于以协调一致的方式制定国家监管框架。这些要求包括带编号的“总体”要求用“必须”来表述。许多要求并不针对某一特定方，暗示的是相关各方负责履行这些要求。

安全导则

“安全导则”就如何遵守安全要求提出建议和指导性意见，并表明需要采取建议的措施（或等效的可替代措施）的国际共识。“安全导则”介绍国际良好实践并且不断反映最佳实践，以帮助用户努力实现高水平安全。“安全导则”中的建议用“应当”来表述。

原子能机构安全标准的适用

原子能机构成员国中安全标准的使用者是监管机构和其他相关国家当局。共同发起组织及设计、建造和运行核设施的许多组织以及涉及利用辐射源和放射源的组织也使用原子能机构安全标准。

原子能机构安全标准在相关情况下适用于为和平目的利用的一切现有和新的设施和活动的整个寿期，并适用于为减轻现有辐射危险而采取的防护行动。各国可以将这些安全标准作为制订有关设施和活动的国家法规的参考。

原子能机构《规约》规定这些安全标准在原子能机构实施本身的工作方面对其有约束力，并且在实施由原子能机构援助的工作方面对国家也具有约束力。

原子能机构安全标准还是原子能机构安全评审服务的依据，原子能机构利用这些标准支持开展能力建设，包括编写教程和开设培训班。

国际公约中载有与原子能机构安全标准中所载相类似的要求，从而使其对缔约国有约束力。由国际公约、行业标准和详细的国家要求作为补充的原子能机构安全标准为保护人类和环境奠定了一致的基础。还会出现一些需要在国家一级加以评定的特殊安全问题。例如，有许多原子能机构安全标准特别是那些涉及规划或设计中的安全问题的标准意在主要适用于新设施和新活动。原子能机构安全标准中所规定的要求在一些按照早期标准建造的现有设施中可能没有得到充分满足。对这类设施如何适用安全标准应由各国自己作出决定。

原子能机构安全标准所依据的科学考虑因素为有关安全的决策提供了客观依据，但决策者还须做出明智的判断，并确定如何才能最好地权衡一项行动或活动所带来的好处与其所产生的相关辐射危险和任何其他不利影响。

原子能机构安全标准的制定过程

编写和审查安全标准的工作涉及原子能机构秘书处及分别负责应急准备和响应（应急准备和响应标准委员会）（从 2016 年起）、核安全（核安全标准委员会）、辐射安全（辐射安全标准委员会）、放射性废物安全（废物安全标准委员会）和放射性物质安全运输（运输安全标准委员会）的五个安全标准分委员会以及一个负责监督原子能机构安全标准计划的安全标准委员会（安全标准委员会）（见图 2）。

原子能机构所有成员国均可指定专家参加四个安全标准分委员会的工作，并可就标准草案提出意见。安全标准委员会的成员由总干事任命，并包括负责制订国家标准的政府高级官员。

已经为原子能机构安全标准的规划、制订、审查、修订和最终确立过程确定了一套管理系统。该系统阐明了原子能机构的任务；今后适用安全标准、政策和战略的思路以及相应的职责。

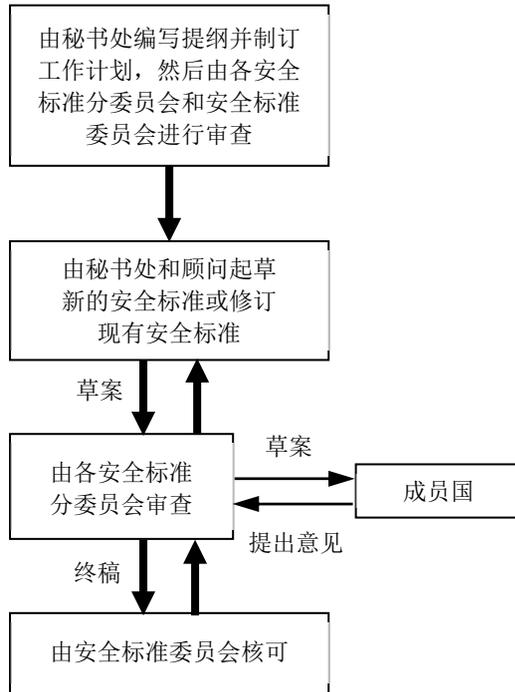


图 2. 制订新安全标准或修订现行标准的过程。

与其他国际组织的合作关系

在制定原子能机构安全标准的过程中考虑了联合国原子辐射效应科学委员会的结论和国际专家机构特别是国际放射防护委员会的建议。一些标准的制定是在联合国系统的其他机构或其他专门机构的合作下进行的，这些机构包括联合国粮食及农业组织、联合国环境规划署、国际劳工组织、经合组织核能机构、泛美卫生组织和世界卫生组织。

文本的解释

安全相关术语应按照《国际原子能机构安全术语》（见 <http://www-ns.iaea.org/standards/safety-glossary.htm>）中的定义进行解释。否则，则采用具有最新版《简明牛津词典》所赋予之拼写和含义的词语。就“安全导则”而言，英文文本系权威性文本。

原子能机构《安全标准丛书》中每一标准的背景和范畴及其目的、范围和结构均在每一出版物第一章“导言”中加以说明。

在正文中没有适当位置的资料（例如对正文起辅助作用或独立于正文的资料；为支持正文中的陈述而列入的资料；或叙述计算方法、程序或限值和条件的资料）以附录或附件的形式列出。

如列有附录，该附录被视为安全标准的一个不可分割的组成部分。附录中所列资料具有与正文相同的地位，而且原子能机构承认其作者身份。正文中如列有附件和脚注，这些附件和脚注则被用来提供实例或补充资料或解释。附件和脚注不是正文不可分割的组成部分。原子能机构发表的附件资料并不一定以作者身份印发；列于其他作者名下的资料可以安全标准附件的形式列出。必要时将摘录和改编附件中所列外来资料，以使其更具通用性。

目 录

| | |
|---|-----------|
| 1. 导言 | 1 |
| 背景 (1.1-1.8)..... | 1 |
| 目的 (1.9)..... | 2 |
| 范围 (1.10-1.11)..... | 3 |
| 结构 (1.12-1.13)..... | 4 |
| 2. 国家政策和国家当局 (2.1-2.9) | 4 |
| 3. 室内氡照射的控制 | 6 |
| 总则 (3.1-3.2)..... | 6 |
| 氡-222 的照射 | 7 |
| 室内氡-222 的来源和浓度 (3.3-3.12)..... | 7 |
| 提供有关氡的信息 (3.13-3.17) | 9 |
| 室内氡调查 (3.18-3.22) | 10 |
| 氡行动计划 (3.23-3.59) | 11 |
| 氡-220 的照射 | 20 |
| 室内氡-220 的来源和浓度 (3.60-6.61)..... | 20 |
| 室内氡-220 测量 (3.62-6.64)..... | 20 |
| 控制和减少氡-220 的照射 (3.65-3.67)..... | 21 |
| 4. 室内 γ 辐射照射控制 | 21 |
| 天然 γ 辐射 (4.1-4.9)..... | 21 |
| γ 辐射测量方法 (4.10-4.12)..... | 23 |
| γ 辐射调查 (4.13-4.14)..... | 23 |
| γ 照射控制和降低 | 24 |
| 土壤 γ 辐射 (4.15-4.16)..... | 24 |
| 建筑材料的 γ 辐射 (4.17-4.27)..... | 24 |
| 现有建筑中建筑材料 γ 辐射 (4.28-4.30)..... | 27 |
| 参考文献 | 29 |
| 附件 I 氡-222 高发区氡气调查与浓度图绘制 | 33 |
| 附件 II 氡-222 和氡-220 的测量技术 | 43 |
| 附件 III 采取降低新住宅和其他新建建筑中氡-222 浓度预防措施 | 55 |
| 附件 IV 采取减少现有住宅和其他建筑物中氡-222 浓度的纠正措施 | 59 |

附件 V 关于氡所致风险的公众宣传计划65

附件 VI 适用建筑材料的评估算法69

参与起草和审订人员83

1. 导言

背景

1.1. 原子能机构安全基本标准出版物《基本安全标准》[1]确定了保护人类和环境免受放射性危害的安全目标和安全原则。标准 10 规定：“为减少现有或不受监管的辐射风险而采取的防护行动必须正当性和最优化。”标准涵盖了天然辐射源的照射这一类情况，此照射况包括住所和工作场所的氡照射¹，以及建筑材料中天然放射性核素的 γ 外照射。

1.2. 原子能机构“安全要求”出版物第 GSR Part 3 号《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》[2]规定了保护人类免受电离辐射（下称辐射）和辐射源安全的要求。原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号要求以联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）提供的关于辐射照射效应的数据[3]和国际放射防护委员会（ICRP）的建议[4]为依据的，目的是为辐射防护法规提供依据。

1.3. GSR Part 3 规定公众辐射防护一直是辐射防护要求的一部分。然而，涉及保护公众免于天然辐射源照射方面的指导相对较少。本“安全导则”关注室内照射这一天然辐射源的确定和合理的测量措施以保护公众免受室内天然辐射源的照射，填补公众辐射防护这一空白。因为通常室内辐射照射水平要高于室外辐射照射，却比室外辐射照射更容易控制。

1.4. 在国际放射防护委员会第 103 号[4]出版物报告中，国际放射防护委员会特别强调了室内氡对公众的照射问题，认为有必要制定辐射防护标准。在国际放射防护委员会第 65 号[5]出版物报告中，国际放射防护委员会就现有住所、新住所以及地上和地下工作场所的氡行动水平提出了建议，并就氡照射高发地区的识别和预防措施和纠正行动提出了建议。国际放射防护委员会在其 2009 年关于氡的声明[6]中建议，将氡-222 每年有效剂量 10 毫希沃特作为行动水平，高于这一水平肯定需要采取行动减少照射。国际放射防护委员会考虑到最新的调查结果，将高居留因子住所氡气参考水平上限从

¹ 在本“安全导则”中，与 GSR Part 3 一样，术语“氡”用于表示元素氡的两种主要同位素（氡-222 和氡-220）的所有照射情况。

600 贝可/立方米（2007 年建议中提出的氡气参考水平）修订为 300 贝可/立方米。

1.5. 世界卫生组织（WHO）根据室内氡-222[7]照射造成公众患肺癌数量的流行病学调查，强调公众室内氡-222 的放射性危害。世界卫生组织《室内氡手册》提供了降低氡-222 健康风险的详细建议，以及预防和减少氡-222 照射的政策或措施建议。世界卫生组织世卫组织以最大限度地减少氡-222 对室内健康的危害建议的氡-222 的参考水平为 100 贝可/立方米，并补充说，“如果所在国家条件无法达到这一水平，所选参考水平也不应超过 300 贝可/立方米”。

1.6. 国际放射防护委员会第 82 号[8]出版物中讨论了建筑材料和地面天然放射性核素所造成的照射问题。国际放射防护委员会建议有条件的国家，可通过干预加以控制的一些如造成长期照射的主要商品（如某些建筑材料）的剂量，参考剂量水平约为 1 毫希沃特。国际放射防护委员会建议，有关的国家组织，有关的国际组织，应酌情制定商品的辐射参考水平，特别是涉及特定建筑材料的辐射参考水平。

1.7. 市民因食物中含有天然放射性核素而受到放射性危害的可能性一般较低，而且通常不受监管。如果天然放射性核素在食品中的浓度增加，例如设施运行或放射性核素排放活动浓度增加，则必须符合计划照射情况的要求。世界粮农组织/世界卫生组织食品法典联合委员会（FAO/WHO）[9]公布了国际食品贸易和人类消费食品中放射性核素的指导水平，适用于核或辐射应急可能存在受污染食品的情况。

1.8. 世界卫生组织在最近修订的《饮用水质量标准》[10]中涉及饮用水中存在天然放射性核素的问题。世界卫生组织概述了通过使用放射性筛查水平控制饮用水中天然放射性核素和人工放射性核素摄入的方法。它还规定了一种控制饮用水中氡析出进入室内空气的方法。

目的

1.9. 本“安全导则”按照参考文献[2]要求提供了公众室内天然辐射照射的推荐建议。标准提供了国家当局控制室内氡和建筑材料中的天然放射性核素等天然辐射源控制的正当性和最优化的实施要求。

范围

1.10. 本“安全导则”范围包括公众在室内因天然辐射源而受到的辐射照射。本标准提供监管机构和所有其他负责天然辐射照射的主管部门和组织（下称“国家主管部门”，定义见第 2.3 段）遵循参考文献[2]要求时的指导与建议。特定指导和建议包括以下内容：

- (a) 氡-222 公众室内照射和其他氡-222 较高的公共建筑物公众的照射，包括幼儿园、学校和医院等建筑物。也需要考虑个人居留较多的情况（参考文献[1]第 3.23 段）以及高居留因子建筑。考虑辐射照射途径为：土壤析出的氡-222；住所建筑材料析出的氡-222；通过供水进入住所的氡-222。
- (b) 住所中的氡-220 对公众的照射。考虑的照射途径为：从土壤析出的氡-220，住所建筑材料析出的氡-220。通过供水系统进入住所的氡-220 不太可能成为主要的辐射源。
- (c) 土壤和建筑材料中天然放射性核素 γ 辐射对公众的外照射。“建筑材料”是用于建造住所、办公室、厂房和其他工作场所等建筑物的材料。

1.11. 本“安全导则”不包括以下内容：

- (a) 不在范围之内，不适合控制的人体内的钾-40 和地球表面的宇宙射线而引起的辐射（见参考文献[2]第 1.42 段脚注 7）。
- (b) 因天然辐射导致的工作人员受到的辐射照射（见参考文献[2]第 3.4 (a) 段）。本“安全导则”提到了在办公室和工厂等工作场所中氡-222 和氡-220 职业照射的管理，但此类指导和建议将在正在编写的《职业辐射防护》安全导则中提供。
- (c) 因天然源的排放和放射性废物管理而造成的公众照射（见参考文献[2]第 3.4 (b) 段）。这些照射包括在关于环境放射性排放的监管[12]和矿物采矿、加工和其他与天然存在放射性物质有关活动的放射性残留物的管理[13]安全导则中。
- (d) 因为航空旅行中公众受到宇宙射线的照射认为不受控制，因此不在参考文献[2]以及本“安全导则”范围内。
- (e) 食品和饮用水中天然放射性核素对公众的照射。

- (f) 办公室和工厂等公众居留较少的工作场所的氡对公众的照射。有导游服务的洞穴旅游，游客接触氡的时间可能很极短，因此通常不需要加以控制。
- (g) 用于建造道路、桥梁、水坝和海堤等基础设施材料中的天然放射性核素在建筑材料中对公众的照射。由于接触时间较短，因此它们不会对公众造成明显影响。

结构

1.12. 第 2 部分就有关的政府、法律和监管框架以及国家当局的作用与标准领域政策制定提出了指导和建议；第 3 部分概述了氡-222 和氡-220 照射的风险，并就管理这些风险的方法提供了指导和建议；第 4 部分提供了控制建筑材料辐射照射的监管办法指导和建议。

1.13. 六个附件提供了进一步的指导，特别是关于氡是天然辐射源照射的主要来源的指导。附件 I 提供了室内氡水平调查指南；附件 II 讨论了氡的测量技术；附件 III 提供了防止氡在新住所和其他建筑物中积聚的施工技术指南；附件 IV 讨论了减少现有住所和其他建筑物中高浓度氡而采取的纠正行动；附件 V 概述了提高对氡有关风险的认识的新方案；附件 VI 提供了控制室内建筑材料中天然放射性核素辐射照射算法的应用实例。

2. 国家政策和国家当局

2.1. 参考文献[14]要求“政府应建立一个有效的防护系统，以减少与（天然或人工来源的辐射）不受监管的辐射源、和过去活动或事件造成的污染的较大辐射风险，并符合正当性和最优化原则”（参考文献[14]要求 9）。这种不受监管的天然辐射源包括住所和其他居留因子高的建筑物中的氡-222 和氡-220 照射，以及建筑材料中存在的天然放射性核素的辐射照射。

2.2. 参考文献[2]要求“政府应确保对已识别的现存照射情况进行评价，并从辐射保护的角度确定关注的职业照射和公众照射”（参考文献[2]要求 47）。这种情况下，要求政府明确防护和安全的责任，并制定适当的参考水平（参考文献[2]第 5.2 段）。

2.3. 有效实施保护公众免于室内天然辐射源照射，可能涉及（多个）不同的机构和部门。在本“安全导则”中，“国家主管部门”一词用于统称负责与天然辐射源照射有关工作的监管机构及所有其他主管部门和机构。这些机构可包括但不限于参与辐射防护和公共卫生政策的部门、专门从事辐射测量的公共和私营机构以及制定和执行建筑标准的部门。通常牵头机构应是辐射防护法规（负责）部门。

2.4. 国家主管部门应启动一项评定，以确定住所开发阶段室内如氡-222、氡-220 和 γ 射线照射等天然辐射源测量的必要性，以便降低辐射源照射的防护措施。

2.5. 一旦经过评定，如需采取进一步措施时，就应制定一项全面的政策，以确保最有效地保护公众免于室内天然辐射源的照射。

2.6. 国家当局须采用保护公众免于室内天然辐射源照射的方案与天然辐射源的有关辐射风险相适宜的防护战略。国家当局还必须确保所采取的防护行动预期产生的益处足以抵消采取这些行动所带来的付出或危害，包括辐射风险；即必须确保保护行动是正当的（见参考文献[2]第 5.7 段）。还要求国家当局确保这种保护行动的形式、规模和持续时间得到优化（见参考文献[2]第 5.8 段）。

2.7. 天然辐射源对室内居民的照射通常以氡-222 为主。国家主管部门应使用描述氡-222 试验方法的国家标准和国际标准方法进行国家和区域氡-222 调查，以确定人口接触氡-222 的程度[15]。这种调查还有助于确定氡-222 浓度高于平均值的地区，通常被为氡-222 危害高发地区（见第 3.42—3.45 段）。氡-220 照射调查（见第 3.62—3.64 段）和建筑材料 γ 辐射照射调查（见第 4 部分）在一些情况下也是行之有效的。

2.8. 国家当局在完成第 2.7 段概述的行动之后应当：

- (a) 为氡-222 确定参考水平，必要时为住所² 确定氡-220 的参考水平（见第 3.35—3.40 段和第 3.65 段）；
- (b) 根据 GSR Part 3[2]规定的放射性浓度水平，制定建筑材料中天然放射性核素浓度国家控制标准（见第 4 部分）；

² 住所的参考水平也适用于其他供公众使用的占用率高的建筑物。

- (c) 为确定超过氡参考水平的公众现有住所和其他高居留因子的建筑物制定现场测量程序；
- (d) 建立一个可确定建筑材料会导致公众照射高于参考水平的程序；
- (e) 为现有住所、新住所和其他供公众高居留因子的建筑物（见第 3.23—3.59 段、第 3.65—3.67 段）降低氡-222 和氡-220 照射，以及控制建筑材料中放射性核素浓度（见第 4.17—4.27 段）开发和实施监管框架。这一框架应包括各种降低氡-222 和氡-220 的办法以及全过程经济代价评价。

2.9. 国家主管部门应考虑是否按照第 3 部分和第 4 部分情况监管、控制或减少室内天然辐射源照射以及适当性。国家主管部门按照第 3 部分和第 4 部分指导和建议或确定法规时，国家当局应考虑到预期的社会和经济后果以及执行方面的潜在困难。另外，须考虑辐射防护最优化原则。

3. 室内氡照射的控制

总则

3.1. 天然存在主要的三种氡同位素：氡-222、氡-220 和氡-219。氡-222 的半衰期为 3.82 天，由天然放射性核素铀-238 经过一系列的衰变产生。氡-220 的半衰期为 55.6 秒，由天然放射性核素钍-232 经过一系列的衰变产生的。氡-219 的半衰期为 3.96 秒，由天然放射性核素铀-235 经过一系列的衰变产生。由于氡-219 半衰期短，且通常土壤中的铀-235 浓度很低，氡-219 引起的照射剂量可以忽略不计，因此不是主要的辐射问题。

3.2. 产生氡-222 和氡-220 的放射性核素源自天然环境中或者过去实践活动的结果，或者两者组合。在防护术语上没有对这些不同的照射原因加以区分。然而，当需要采取行动降低辐射照射时，应根据照射途径考虑不同的办法。

氡-222 的照射

室内氡-222 的来源和浓度

3.3. 由于氡-222 来源于存在于地面相对高浓度的铀-238，并且氡-222 的半衰期足够长可以使它的浓度在室内积累，所以氡-222 是室内天然辐照射的主要源项。由于镭-226 的放射性衰减，氡-222 不断地从地面释放出来。当氡-222 释放到空气中时，它会迅速稀释到无害的浓度。室外氡-222 的典型浓度为 10 贝可/立方米[16]，但据长期研究显示平均浓度范围为 1 贝可/立方米至 100 贝可/立方米以上[17]。

3.4. 在绝大多数情况下，室内氡-222 主要源于建筑物的地下。尽管源于建筑材料的氡-222 通常比地面来源的要少，但建筑材料也是氡-222 的主要来源。

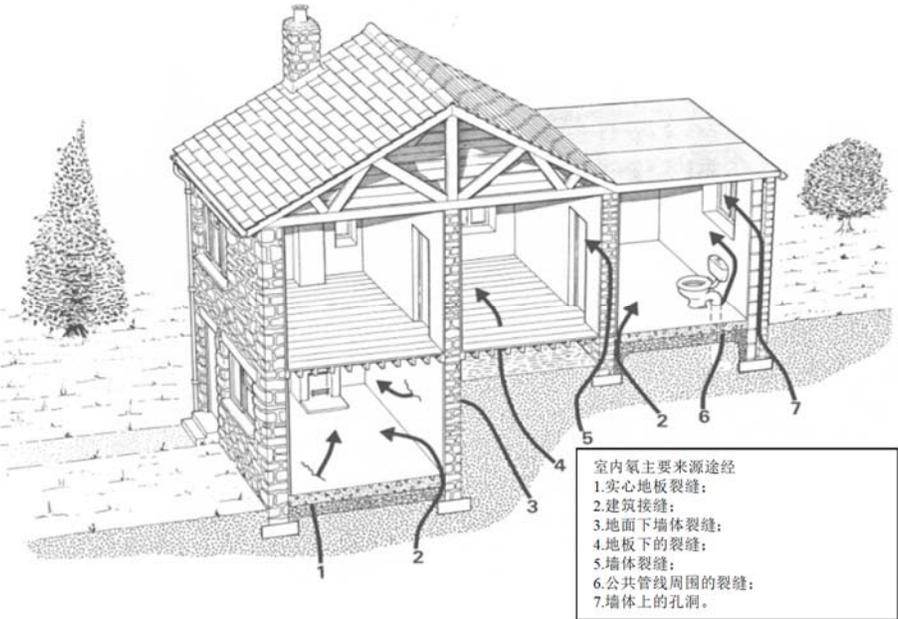


图 1. 室内氡主要来源途径（图片由英国建筑研究机构提供；经许可转载）。

在一些供水情况下³，供水系统中的氡-222 也会析出到室内。

3.5. 因为室内空气通常较室外暖和，大多数建筑物的地面气压略低于室外气压，这会导致空气及其载带的氡-222 从地面吸入建筑物。吸入的通道主要为楼板与墙体之间的缝隙、楼板裂缝、管道与电缆周围的缝隙（见图 1）。室内氡-222 水平有季节性变化与室外平均温度的变化相对应（如冬季氡-222 水平通常高于夏季）。

3.6. 室内氡-222 浓度范围大，通常覆盖几个数量级。在一个国家或一个国家的某个区域范围内，氡-222 的浓度分布通常是对数正态分布或接近对数正态分布。在某些情况下，氡-222 浓度高的住所可能导致居民所受辐射剂量远远超过职业照射年剂量限值。

3.7. 全世界所有居民区氡-222 的人口加权算术平均浓度估计值为 39 贝可/立方米[16]。

3.8. 建筑材料中的镭产生的氡-222 也会导致室内氡-222 浓度的增加。当室内氡浓度较低时，建筑材料的相对贡献通常更为重要。建筑材料析出的氡-222 在高浓度氡-222 的室内的贡献较少。

3.9. 砖房模拟计算表明，建筑材料平均析出到室内的氡-222 浓度贡献约为 10 贝可/立方米[17]。这约占全球室内氡-222 平均浓度的 25%。对于欧盟，建筑材料对室内氡-222 浓度的典型贡献估计为 10—20 贝可/立方米[18]，相当于 0.3—0.6 毫希沃特范围的年个人有效剂量。美国建筑材料对室内氡-222 浓度的贡献估计在 4—7 贝可/立方米[19]范围内。

3.10. 在某些情况下，建筑材料产生的氡-222 对室内氡-222 浓度的贡献可能高达 1000 贝可/立方米或更高[18]。在这种情况下，室内 γ 辐射的相应有效剂量率极有可能超过参考文献[2]第 5.22 段规定的建筑材料参考水平，即 1 毫希沃特/年。这一点将在下文第 3.55 段和第 4 部分中详细讨论。由此可见这类情况的氡-222 析出可通过控制建筑材料实现。

3.11. 通常地表水含的氡-222 的浓度极低。地下水和私人供水中抽取的水中可发现氡-222 浓度水平升高。饮用水中的氡-222 对室内氡-222 总浓度的贡献不是恒定的，因为只有当水通过水龙头或淋浴排放时才会析出。由于这

³ 用水中氡照射的控制标准参见世界卫生组织现行《饮用水质量标准》[10]第 9 节。

一原因，尽管氡-222 短期内可能出现高浓度，水中释放的氡-222 在高氡的室内情况很少会是氡-222 的主要来源。饮用含有氡-222 的水也是一种潜在的照射途径。关于减少饮用供水系统中高浓度氡-222 的信息见世界卫生组织饮用水质量标准[10]。

3.12. 联合国原子能辐射效应委会[3]报告说明，饮用水中释放的氡-222 的吸入量平均占饮用水中氡-222 所致剂量的 90%。此外，饮用水向室内空气中释放的氡-222 吸入的平均有效剂量约为 0.025 毫希沃特，而从所有来源的氡-222 及其衰变产物中吸入的平均总有效剂量为 1.1 毫希沃特[3、17]⁴。因此，虽然吸入是饮用水中存在的氡-222 的主要照射途径，但所接受的平均剂量通常只是室内其他来源的氡-222 剂量的一小部分。然而，对于处于富铀基岩的深井供水区的家庭来说，家庭供水可能是室内空气中氡浓度升高的最重要因素，其导致个人剂量可能达到几毫希沃特[20、21]。

提供有关氡的信息

3.13. 据参考文献[2]要求 50 规定：“政府应提供室内氡水平和健康风险的相关信息，并应根据情况制定和实施行动计划，控制室内氡对公众的影响。”

3.14. 无论是否开展或计划开展氡测量，都必须给公众提供氡的相关信息，提供的典型信息示例包括：关于全世界氡的分布及其差异性的一般信息；包含氡照射与吸入吸烟间的协同关系的室内氡长期照射所产生的健康风险科学证据，防止氡在新建筑中氡浓度的积累和采取纠正行动以降低现有建筑中氡浓度过高的基本知识；氡政策与室内空气质量政策的关系，以及节能规定与氡防护行动之间可能的矛盾。如果国家有关于室内氡浓度的可靠数据，则应对公众提供相关信息。理想的情况是，信息通过互联网提供，以便公众等各方人员查阅和下载。

3.15. 造成肺癌的吸烟与氡照射之间有很好的协同作用。吸烟者和最近戒烟的人比终生不吸烟者患肺癌的风险基线要高。氡照射进一步增加了这种

⁴ 参考文献[17]列出了从氡-222 计算的总吸入剂量。计算中假定室内氡-222 的平衡因子为 0.4，室外为 0.6，室内氡-222 的平均活度浓度为 40 贝可/立方米，室外氡-222 的平均活度浓度为 10 贝可/立方米，每年室内 7000 小时和室外 1760 小时的居留因子，平衡浓度剂量转换因子为 9 纳希沃特/(贝可·小时·立方米)。

风险。因此，国家当局在提供有关氡信息和咨询意见时应考虑到这些综合风险，并与国家烟草控制方案统筹[7]。

3.16. 在进行氡测量调查前，国家主管部门应编写关于氡风险的一般信息，以及关于如何进行氡测量和如何向住户通报测量结果的信息。还应包括住户氡测量的保密问题。并向住户，特别是可能应邀参加这种调查的住户分发有关资料。这应包括如果已经设置了参考水平，也应该向住户解释。特别是，应解释如何降低高于参考水平的氡浓度。

3.17. 如果需要制定国家政策来控制氡对公众的影响，国家主管部门应编写资料并提供给包括决策者、医生、专业建筑人员（包括建筑师、工程师、工料测量师和建筑人员）和公众等所有有关人员。由于国家当局可能由诸多不同的职能机构和政府部门组成，因此应密切协调，确保所提供的信息都是明确和一致的。应使国家一级和地方一级的决策者充分了解情况。

室内氡调查

3.18. 政府应确保“通过具有代表性的氡调查等适当手段（参考文献[2]第5.19(a)段），为公众收集有关室内和其他高居留因子建筑中氡活度浓度的信息”。作为评价控制室内氡引起的公众照射所需措施程度的第一步，国家主管部门应评审有关室内氡浓度所有现有数据，特别是预计室内氡浓度较高的地区的测量数据。这包括地质上表明矿藏铀浓度高会导致地下水氡浓度高的土壤和岩溶石灰岩地区。此外，即使土壤中的铀浓度不高，在土壤析出率特别高的地区（如由析出率高的砾石构成的石堆或山脊），室内氡浓度也有可能很高。

3.19. 在没有上述数据时，国家当局应考虑组织本国调查工作。在决定可能开始进行这种调查的地区时，除了上文第3.18段所述的地质标准外，国家主管部门也应评价关于邻国室内氡浓度的现有资料。进行这种本国调查的好处是有助于决定全国调查抽样密度。例如，如果已查明某地质的室内氡浓度很高，而且已知该国家还有许多其他具有类似地质特征的地区，则可以明确在全国调查中对类似地质特征地区进行高密度的测量。另一方面，如果在预计室内氡浓度较高的地区只发现了室内氡浓度较低的情况，则全国调查中采用较低的测量密度可能就足够了。

3.20. 即使对现有数据和国家主管部门开展的局部调查结果的评审没有发现室内氡浓度较高情况，国家主管部门仍应评价居民所受氡照射的情况。这种评价被称为全国氡调查。在进行全国氡调查时有两个主要考虑因素：

- (a) 确定室内氡浓度较高且比例较高的地区。这可以通过地理调查实现。研究结果可绘制氡照射风险图，并确定氡害高发区（见附件 II）；
- (b) 为了与其他辐射源的照射进行比较，估计公众因氡引起的平均照射和照射范围。这方面最合理的依据是据于人口密度[5]随机选择的住所室内氡浓度的全国调查。

3.21. 经过仔细考虑，可以设计单一的调查，同时兼顾第 3.20(a) 和 (b) 段两个因素。为了降低调查的不确定度[22]，每次测量应有几个月以上，最好是能有一年的时间。所获得的结果未来将为氡照射水平及控制公众氡照射国家政策制定和执行以提供支撑。这种政策的各个组成部分统称为行动计划（见第 3.23—3.59 段）。

3.22. 上述调查的住所中氡浓度的变化与氡的来源无关。在大多数情况下，氡来自住所地下，但某些情况下，它来自建筑材料或供水。国家主管部门应单独调查，以查明建筑材料或供水中的氡可能对室内空气中氡浓度产生的重大影响。

氡行动计划

一般考虑

3.23. “在查明与公共卫生有关的氡活度浓度时，政府应确保制定一项包括采取协调一致行动计划，降低现有建筑物和未来建筑物中的氡活度浓度”（参考文献[2]第 5.20 段）。这种行动计划应由国家主管部门执行，并要求国家主管部门采取下列行动：

- (a) 为“住所及其他居留因子较高的公众建筑建立合理的氡-222 参考水平”（参考文献[2]第 5.20 (a) 段）；
- (b) 决定例如幼儿园、学校及医院等，可供市民使用居留率较高的其他类型的建筑物并应将其纳入氡气行动计划的范围内；
- (c) 为办公室和工厂等工作场所建立合理的氡-222 的参考水平；
- (d) 以方便测量住所及其他居留率较高的公众建筑物内的氡-222；

- (e) 确定氡-222 的高发区域；
- (f) “在最有效降低氡-222 的活度浓度的情况下，优先采取降低行动”（见参考文献[2]第 5.20 (c) 段）。这包括降低饮用水的氡-222 浓度，酌情控制建筑材料中的镭含量；
- (g) “在建筑规范中提供包括合理的预防措施和纠正措施，以防止氡-222 照射，并在必要时采取进一步的行动”（见参考文献[2]第 5.20 (d) 段）；
- (h) 实施控制和降低氡-222 照射的措施，包括确定在何种情况下此类措施是强制性的还是自愿性的；
- (i) 评价行动计划的成败。

关于制定氡问题行动计划的进一步指导，见世界卫生组织《室内氡问题手册》[7]。国家氡行动计划的实例见参考文献[23—26]。

3.24. 国家主管部门应确保氡行动计划与国家其他计划如室内空气质量和能效方案密切协调。例如，建造节能住所可能导致比现有住所更低的空气交换率。根据国家建筑法规的要求，这可能导致由土壤中析出的气体（含氡-222）流入建筑物的流量增加或减少。通过提高建筑物中的热效率，室内空气的较高温度可导致建筑物内的压力降低，从而可导致氡-222 从土壤流入建筑物的流量增加。应调查建造方法的变化，如与室内空气质量或能效有关的变化，以了解其对室内氡浓度的影响以及对氡的纠正行动和预防措施的执行情况。如果建造方法变化可能导致室内氡浓度增加，则应考虑在国家建筑法规中进一步改变建造方法。

辐射防护正当性与最优化原则

3.25. 政府和监管机构或其他有关主管部门必须确保纠正措施和防护行动是正当的，并确保防护和安全达到最优化（参考文献[2]要求 48）。

3.26. 减少室内氡浓度计划防护策略是实现个人或社会利益大于其危害与消耗。各国政府或国家主管部门负责辐射防护措施正当性的决定。

3.27. 支持采取辐射防护措施正当性包括：氡是公众照射的一个重要来源，在一般人群中是仅次于吸烟的第二大肺癌原因；可采用可行的技术降低室内高浓度氡；氡政策包括其他公共卫生政策，如室内空气质量政策，或吸烟政策[7、27]。

3.28. 应通过一个持续的、周期性的优化进程来实现低于参考水平的防护，这一进程包括：评价情况，以确定采取行动的必要性（制定实践进程框架）；根据最新的技术知识确定可能的防护措施，尽可能降低照射风险；在当前情况下选择最佳方案；实施选定的办法；并定期评审，以评价目前的情况是否需要采取纠正措施[28]。

3.29. 在国家氡行动计划中开展最优化，并在低于参考水平下实现氡浓度合理尽可能低。

3.30. 可使用标准的成本效益技术优化室内氡照射防护。可以比较与估计不同照射水平下可能由氡引起的肺癌案例数相关的财务成本、防护措施的选择以及为减少室内氡照射而采取的预防措施和纠正措施的成本。这种分析可用于确定降低现有建筑物和新建筑物中氡浓度措施的代价利益分析[7]。

氡-222 浓度的测量

3.31. 国家和区域氡调查需要对住所中的氡进行测量，以确定个别住所中的氡浓度是否高到令人无法接受[15]。因为住所之间的氡浓度差异很大，因此，一个住所中的氡浓度低或高不能作为附近其他住所中氡浓度的指标，所以需要每个住所进行氡测量。另外，可以通过对氡浓度进行测量衡量降低较高浓度氡而采取的措施是有效的[15]。氡的测量可由国家主管部门或如技术支助组织、学术机构或私营公司，或由这些组织的组合的其他组织开展。

3.32. 对于公众居留因子高的住所及其他建筑物中的氡测量，国家主管部门应特定说明：

- (a) 最小测量周期；
- (b) 氡探测器质量标准；
- (c) 应用的测量协议；
- (d) 测量是否限于某些季节；
- (e) 结果是否应用季节性校正因子；
- (f) 向住宅业主和其他高居留因子建筑物的公众提供报告结果的质量标准；

(g) 应向氡浓度超过参考水平的居民和其他高居留因子建筑物的业主提供建议。

这些标准可能因氡测量的目的而异。氡的测量技术详见附件 II。

3.33. 国家主管部门应建立质量管理体系，以确保对氡测量结果的较高可信度。应要求所有测量氡浓度的组织展示其准确测量氡浓度的能力，并应定期参加比对活动[29]。

3.34. 如果一家私营公司进行氡测量，应尽可能向国家主管部门提供测量结果。国家主管部门全面负责制定氡政策，并可利用氡测量数据确定氡高发地区。同时应考虑户主氡测量的保密问题。

氡-222 参考水平的确定

3.35. 一旦通过适当的调查评定了氡-222 引起的公众照射，就应确定氡的活度浓度是否影响到公众健康。如果是，国家主管部门必须为住所和其他居留因子高的公共建筑物选择并采用氡-222 的参考水平。GSR Part 3[2]（第 5.20(a) 段）要求在确定适当的参考水平时考虑到目前的社会和经济情况下氡-222 年平均活度浓度不会超过 300 贝可/立方米。⁵参考水平应适用于住宅和其他居留因子较高的公共建筑物。

3.36. 世界卫生组织在其《室内氡手册》[7]中建议参考水平为 100 贝可/立方米，以最大限度地减少室内氡-222 照射对健康的危害，并指出“如果在当前的国家条件下无法达到这一水平，则所选参考水平不应超过 300 贝可/立方米”。

3.37. 在确定参考水平时，国家主管部门应与相关各方磋商。选择的参考水平，应能使实践是切实可行和可管理的。例如，选择的参考水平时，让大多数现有住房必须采取纠正行动是切合实际的。在选择恰当的参考水平时，应考虑在不同参考水平下需要采取纠正措施的住所百分比。

⁵ 假设氡-222 的平衡因子为 0.4，年占用率为 7000 小时，300 贝可/立方米的活度浓度值对应于 10 毫希沃特量级的年有效剂量。

3.38. 参考水平不应被视为安全与危害之间的分界线。而是将其用作指导值，一旦超过该指导值，应立即考虑采取可能降低氡-222 引起照射的措施。国家主管部门可决定将与氡-222 有关的风险与其他日常风险进行比较。

3.39. 大多数国家主管部门基于简单和一致的理由，为公众现有住所和其他居留因子高的建筑物以及为公众新建住所和其他居留因子高的建筑物规定了一个单一的参考水平。在某些情况下，国家主管部门为新住所和其他公众居留因子高的建筑物规定的参考水平低于现有住所和其他公众居留因子高的建筑物。一般而言，在新住所中实现低浓度的氡-222 比在现有住所中实现低浓度的氡-222 更具成本效益，并且更容易采取必要的措施。

3.40. GSR Part 3[2]要求，一般住所和居留因子高的其他建筑物的氡-222 参考水平年平均活度浓度不超过 300 贝可/立方米。如果国家数据表明，在某一特定状态下，平衡系数或居留因子与假设值相差很大，但年有效剂量不超过 10 毫希沃特下参考水平高于 300 贝可/立方米可能是合理的。但是，这种决定应根据整个国家的情况作出，而且只应在特例情况下作出。因为在同一国家内为不同区域设定不同的参考水平可能导致实践的困难。从实践看目前不适宜同一国家内为不同区域设定不同的参考水平。

3.41. 在公众低居留因子的建筑物，例如办公室、商店和公共图书馆，工作人员和公众的照射是通过职业照射控制来管理的。第 17 页的方框中提供了有关此类工作场所氡照射管理的信息。

氡高发区

3.42. 在绘制了氡图（见附件 I）之后，就有可能查明氡-222 浓度可能高于平均值的地区。这些地区通常被指定为氡高发区⁶。氡-222 的最高个别浓度往往出现在氡-222 平均浓度最高的地区。在指定的氡高发区以外，也会有氡浓度高于参考水平氡-222 的住宅。

3.43. 国家主管部门应确定其疆域内的氡高发区，并应考虑在这些地区采取的特定措施。人们提出了关于氡高发区的各种定义。国际放射防护委员会 [5]建议，氡高发区可定义为超过一定百分比的住宅氡浓度超过全国平均值十倍的地区。一些国家将氡高发区定义为据估计超过一定百分比的住宅的

⁶ 在一些国家，这类地区被称为“高氡区”或“氡影响区”。

氡浓度超过参考水平的地区。一旦决定，未经严格谨慎考虑，不应改变氡高发区的定义；但在获得更多资料后可对区域进行修正。

3.44. 新建筑室内氡照射防护的另一种方法是直接现场测量土壤中的氡-222 和土壤氡-222 析出率。然后针对如下情况制定预防措施：在某一建筑区域测量土壤特性和建筑物的设计。简单、低成本的采样和测量方法可用于此目的。捷克共和国自 1991 年以来一直采用这一办法[30、31]。

3.45. 氡高发区的概念是国家主管部门使用的一种方法，可以在诸多方面使用。例如，国家主管部门应考虑如何利用氡高发区识别来宣传氡-222 的照射风险，并鼓励住户进行氡测量。此外，在氡高发地区，国家主管部门应要求尽量使用降低氡-222 的建筑技术和方便后期氡-222 去除的施工技术。在某些情况下，特别是考虑到其他空气质量问题下，引入尽量降低氡-222 进入所有区域的建筑技术可能更具经济效益。详见附件 III 和附件 IV。

氡-222 照射的控制和降低

3.46. 国家主管部门必须确保实现的目标防护策略（参考文献[2]第 5.4 (a) 段）。应通过防护策略实现的一个目标是查明氡-222 浓度高于参考水平的住房，并降低氡-222 浓度。应实现的第二个目标是降低住所中氡-222 的平均浓度。只有在建造新住宅时采用限制氡-222 进入住所的建筑规范和实践，才能显著降低氡-222 的平均浓度。这种变化将在一段时间内减少氡-222 的平均浓度和随后的照射，并减少氡对公众健康的影响。

3.47. 国家主管部门必须安排，“评价实现目标可采取的治理措施和防护措施”（参考文献[2]第 5.5 (a) 段）。有效、可靠、效益成本好和相对容易的控制措施是氡行动计划的重要组成部分。国家主管部门应制定要求，确保提供室内氡活度浓度降低服务的公司熟悉其领域，并确保其工作符合客户的需要。应在现实的工作条件下试验和证明所有技术的有效性，并对其长期有效性进行评价。国家主管部门应考虑为提供服务的公司制定一个授权程序或认证程序。附件 IV 讨论了为降低现有住宅中氡-222 的活度浓度而采取的纠正行动。

3.48. 政府应明确“在何种情况下行动是强制性的还是自愿的，同时考虑到法律要求和当时的社会和经济情况”（参考文献[2]第 5.21 (b) 段）。

公众居留因子较低情况的工作场所氡管理

对于办公室和工厂等非计划的氡照射的工作场所，国家主管部门必须为氡-222 设定一个参考水平，该参考水平对于氡-222 年平均活度浓度不得超过 1000 贝可/立方米（参考文献[2]第 5.27 段）。选择参考水平值的标准与适用于住宅的标准相同，所选择的值应根据此类工作场所中氡-222 浓度分布的评价。国家主管部门还应以第 3.32 段所述一样的方式确定工作场所的衡量标准。

控制工作场所中氡-222 照射的另一种方法是为所有室内环境设置相同的参考水平，即相同的参考水平将适用于所有住宅、公众居留因子高的其他建筑和工作场所[27]。只有当氡-222 在工作场所的室内分布与在住宅中的分布相似时，这种方法才是合适的，而这种情况可能是也可能不是。然而，国家主管部门可以考虑这一办法是否恰当，是否可行。

在超过工作场所参考水平的情况下，雇主必须采取一切合理步骤，将氡-222 的浓度降至参考水平以下（参考文献[2]第 5.28 段）。一种办法是限制工作人员在特定区域的工时，但这可能难以实现和监控。在某些特定的工作场所，如地下洞穴，改变通风速率可能会降低氡-222 的浓度，但这种改变可能会产生不可接受的后果（例如，古代手绘壁画可能会被损坏，或如洞穴等观光景点可能会被破坏）。无论任何原因无法将氡-222 的浓度降至低于参考水平，国家主管部门必须确保工作人员受到保护，并采用职业照射的相关要求（参考文献[2]第 5.27 段）。在计划照射情况下使用分级方法。

见参考文献[11]附件 I 提供的有关工作人员防护导则。

3.49. 按照分级办法，氡行动计划应包括优先对放射性氡-222 浓度远超过参考水平的住所采取纠正行动的规定，对住所放射性氡-222 浓度略高于参考水平，行动计划还应为这类工作规定一个时间表。国际放射防护委员会[8]指出，年剂量到 100 毫希沃特，进行干预总是正当的。国家主管部门应考虑氡-222 的活度浓度有可能导致年剂量超过 100 毫希沃特时，对那些住所和其他居留因子较高的建筑强制执行纠正行动。

3.50. 关于是否降低高于参考水平的氡-222 活度浓度的决定通常由住宅所有人作出，在大多数国家，它们还必须支付纠正行动的费用。这些行动的成本可能会阻碍住宅所有者采取纠正行动，以减少因氡-222 而造成的照射。政府可考虑是否有可能向住房所有人补偿部分或全部纠正措施的费用，特别是活度浓度非常高的氡-222 住宅所有人。如果提供了这种财务支助，则应在财务支助协定中规定采取后续措施，以评定纠正行动的有效性。

3.51. 在出租住宅方面，国家主管部门应考虑对住宅所有人强制性规定要求，以确保氡-222 的活度浓度低于参考水平。应确保任何这方面的要求都符合与租赁住房有关的现行法律。此外，国家主管部门应确保与氡-222 有关的法律能够在实践中的执行。

3.52. 国家主管部门应考虑氡-222 的活度浓度测量要求和必须测量的地方，以及出售住房时的采取纠正措施。对在出售住房时测量氡-222 的活度浓度的要求可能是有益的，不仅可以增加测量氡-222 的住房数量，而且可以确保对活度浓度超过参考水平的住房采取纠正措施。应根据国家法律框架制定合理的规章和程序。规章和程序制定可参考试验方法[22]和建筑物调查方法[15]。此外，在法律和当前社会条件允许的情况下，国家主管部门应确保银行和保险公司充分参与其中。

3.53. 国家主管部门应制定采用降低新住宅中氡-222 累积的建筑规范和建造方法，降低新住宅中氡-222 累积。这类规范应包括住房使用后 6—12 个月内在新房中氡-222 的测量要求。这些规范应该具有强制性的。在决定这些建筑规范是适用所有地区还是仅适用氡易发地区时，国家主管部门应考虑新住宅氡-222 预防措施效益代价，并与其他公共卫生措施进行比较。附件 III 讨论了降低氡-222 浓度在新住宅中累积的方法。

3.54. 在将氡-222 的预防措施纳入国家建筑法规时，国家主管部门应确保与负责建筑规划和建造的主管部门合作。这包括负责室内空气质量和能效其他方面问题的部门。现场视察（测量）是建筑监管的重要一环。这类建筑法规应包括与建筑视察及建造专业人士的沟通及培训。

3.55. 通常建筑材料的明矾页岩混凝土、火山凝灰岩、花岗岩和磷石膏是放射氡-222 的重要来源。虽然可以测量建筑材料样品中的氡-222，但材料测量的结果与施工后室内氡-222 的活度浓度关系复杂。为此，研究表明，国家

主管部门应通过限制建筑材料中镭-226 的含量来控制其产生的氡-222 的浓度⁷。

3.56. 当氡测量计划表明必须降低某些供水系统中氡-222 的浓度，则应符合世界卫生组织所概述的建议和方法进行[10]。

氡防护的有效性监控

3.57. 国家主管部门应评定氡行动计划的有效性。减少氡的行动不会在公众中立即产生效益，因为主要避免的健康风险是诱导期最长为 35 年的肺癌风险。即使从长期来看，因为风险的减少将分散到非常多的人身上。也无法直接观察到挽救生命的情况。为此，减少氡防护的成效，应以减少住所及其他公众居留因子高的建筑内的氡气活度浓度为基础，因为这可为改善室内空气质量带来额外的好处。可以使用多种指标，例如，氡活度浓度高于参考水平的住宅数量或百分比的减少，或住宅中氡平均活度浓度的降低。

3.58. 因为许多住房拥有者不采纳降低氡浓度的建议，测得或确定的氡活度浓度高于参考水平的现有住房数量，并不能很好地指导氡防护在挽救生命方面的成效。然而，这些参数可用于确定减少氡计划的中期目标。其他参数也可用于设定中间目标，如公众或建筑或医疗专业人员对氡的认识水平。可根据索取资料的次数或要求测量氡浓度的次数，或通过市场研究调查来评价认识水平。

3.59. 在许多国家，公众对氡-222 照射风险的认识粗浅。然而，降低氡的措施需要公众的合作，才能成功地减少住宅中高浓度的氡。作为氡防护的一部分，国家主管部门应制定政策，向公众宣传氡所造成的风险以及预防措施和纠正行动。这些政策还应针对与住房和公共卫生有关的机构和专业群体，如建筑师、建造师、区域和地方政府管理部门以及医疗专业人员。详情见附件 V。

⁷ 研究[18]表明，当 γ 辐射剂量限值在 1 毫希沃特/年以下时，建筑材料中镭-226 的活度浓度实际上必须限制在不大可能导致室内氡-222 活度浓度超过 200 贝可/立方米的水平。

氡-220 的照射

室内氡-220 的来源和浓度

3.60. 氡-220 的半衰期为 55.6 秒，放射性核素在衰变前只能迁移很短的距离。因此，室内氡-220 的活度浓度主要取决于墙体和地板材料表层的氡-220，而不是更深的来源。特别是，在某些情况下，土墙和地板被发现是氡-220 的重要来源。随后剂量的大小将取决于土壤和建筑材料中钍-232 的含量、氡-220 的析出率和建筑物的居留因子。

3.61. 关于住宅中氡-220 和氡-220 子体的活度浓度的数据极为有限，而且往往是基于短期测量。联合国原子辐射效应科学委员会估计，全世界住宅中氡-220 子体的典型放射性活度浓度约为 0.3 贝可/立方米平衡当量浓度⁸，相当于 0.1 毫希沃特的年有效剂量[3]。几乎所有这些剂量都可归因于建筑材料释放的氡-220。个别结果高达 76 贝可/立方米平衡当量浓度。这些高水平室内氡平衡当量浓度如中国和日本是因木屋和泥屋有关，特别高的意大利是因使用天然火山材料建造的建筑有关[32—35]。

室内氡-220 测量

3.62. 国家主管部门应首先对预计氡-220 活度浓度高的住房进行有限的调查，例如有土墙或地板的住宅。与氡-222 一样，建筑材料中放射出的氡-220 的测量结果与室内浓度关系复杂。但必要时，通过控制建材中钍-232 的含量来控制室内空气中氡-220 的活度浓度是最佳方法。

3.63. 一个房间里的氡-220 的分布可能非常不稳定。由于室内空气中存在的氡-220 主要是由建筑材料产生，因此很可能在含有这种建筑材料的墙壁附近发现最高的活度浓度。由于氡-220 的半衰期短，所以大部分在析出前就会衰变。因此，氡-220 的活度浓度随与建筑材料的距离的增加而急剧下降，在 1 米[32]距离处可能降低 100 倍。

⁸ 平衡当量浓度是处于放射性平衡的氡-222 和氡-220 及其短寿命子体的放射性活度浓度，其潜在 α 能量浓度与实际（非平衡）混合物相同。

3.64. 氡-220 可能几乎完全在室内衰变，而氡-220 子体的活度浓度仍然会很高。因此，氡-220 气体的活度浓度不能可靠地指示其子体所提供的剂量。尽管可靠的非能动式测量技术现在可用于测量氡-220 气体，但它们难以提供氡-220 子体的活度浓度的可靠估计，或因此不能提供相关剂量⁹的可靠信息。

控制和减少氡-220 的照射

3.65. 大多数国家的国家主管部门可能不需要对氡-220 的照射进行监管。在一些住宅中发现高活度浓度氡-220 的国家，国家当局应考虑引入氡-220 的参考水平。参考水平应以氡-220 的平衡当量浓度做规定。第 3.35—3.40 段中给出了有关氡-222 参考水平确定的指导意见，相应可以遵照其确定氡-220 参考水平。

3.66. 如果发现某些建筑材料析出大量的氡-220，国家主管部门应考虑按照第 4 部分规定的标准，禁止使用此类建筑材料建造住宅。

3.67. 在住宅中发现高活度浓度的氡-220 子体的情况下，可通过在氡-220 析出的墙壁或地板表面上涂覆油漆或密封剂来显著降低其浓度。在房间居住时远离墙壁和睡在高于地板的床上可以有效地减少氡-220 的吸入。

4. 室内 γ 辐射照射控制

天然 γ 辐射

4.1. 室内 γ 辐射照射的两种主要途径是土壤中的放射性核素和建筑材料中的放射性核素。因为在土壤和建筑材料中含有不同浓度的，如铀-238 及其子体、钍-232 及其子体和钾-40 等天然放射性核素。本部分将介绍有关这两种途径照射的 γ 辐射照射控制指导和建议。

⁹ 在氡-220 子体中，只有铅-212 和铋-212 对 α 潜能浓度有显著贡献[32]。母体核素氡-220 的每贝可贡献比铅-212 低近三个数量级。由于大部分 α 潜能浓度由铅-212 提供，测量空气中铅-212 的活度浓度通常允许很好地估计 α 潜能浓度。

4.2. 经过诸多调查[36—38], 得出了土壤中放射性核素的本底浓度。这些调查结果表明, 铀-238 系列、钍-232 系列和钾-40 系列典型情况下室外和室内 γ 辐射对个人外照射剂量的贡献大致相等。地壳中铀-238、钍-232 和钾-40 的平均活度浓度分别为 33、45 和 410 贝可/公斤[3]。混凝土等建筑材料中的典型活度浓度也相对接近地壳, 在混凝土等建筑材料中镭-226、钍-232 和钾-40 的活度浓度分别为 40、30 和 400 贝可/公斤[18]。

4.3. 全球陆地天然辐射源外照射的年平均有效剂量为 0.48 毫希沃特, 其中 0.41 毫希沃特与室内照射有关(假定居留因子为 80%), 0.07 毫希沃特与室外照射有关(假定居留因子为 20%) [3]。来自陆地天然辐射源的外照射的年平均有效剂量的国家平均水平大多在 0.3—0.6 毫希沃特范围内。

4.4. 居住或工作在建筑内的人所受天然辐射照射与室外有差异。因为在室内, 建筑物有屏蔽作用, 会减少土壤中放射性核素的照射。同时, 建筑材料中含有的天然放射性核素也会增加室内 γ 剂量率。在室内, 建筑也能屏蔽宇宙射线, 虽然这种效果很小。根据联合国原子辐射效应科学委员会的参考文献[3], 全球室内 γ 照射平均剂量率是室外的 1.4 倍, 不同区域该比例由 0.8—2.0 不等。

4.5. 混凝土是最常用的建筑材料之一。混凝土中天然放射性核素浓度的变化将取决于制造过程中使用的主要材料和化学添加剂的类型。通常使用的主要材料是沙子、砾石和瓦片, 它们通常不会增加混凝土中放射性核素含量。然而, 也存在使用其他材料作为主料的情况, 例如高活度浓度镭-226 的浮石和高活度浓度钾-40 和铀-238 的花岗岩。使用这些材料时会明显提高混凝土中放射性核素含量。

4.6. 加气混凝土或轻质混凝土主要由与普通混凝土相同的材料组成, 但在最终产品时加入少量铝粉以形成蜂窝结构。明矾页岩过去曾用作普通混凝土和加气混凝土的主料, 其含有特别高活度浓度的镭-226。一些铝质页岩加气混凝土中镭-226 的活度浓度高达 2600 贝可/公斤[18]。

4.7. 工业副产品和残留物有时会用于做建筑材料。这些材料包括粉煤灰(煤和泥炭燃烧产物)、高炉矿渣和磷石膏。这些材料可能在产生过程中存在浓缩工艺使天然放射性核素的浓度增加[3]。

4.8. 天然建筑材料如花岗岩和大理石都含高浓度的镭-226,花岗岩也可能含有高浓度的钍-232 和钾-40[3]。

4.9. 在世界一些地区已查明土壤中含有极高浓度的天然放射性核素[3]。例如,在阿塞拜疆、巴西、中国、捷克共和国、埃及、印度、印度尼西亚、意大利和罗马尼亚的部分地区,土壤中天然的放射性核素浓度升高,每年将有几毫希沃特的 γ 照射有效剂量。在捷克共和国、伊朗伊斯兰共和国和西班牙的一些地区,年有效剂量可能超过 10 毫希沃特[3]。在这些地方,土壤可能是导致公众 γ 照射的主要途径。

γ 辐射测量方法

4.10. 测量技术的选择取决于是否希望只测量室外或建筑物内的总 γ 辐射照射量,还是希望查明和量化建筑材料中引起此类照射的放射性核素含量[38]。

4.11. 室内 γ 剂量率通常直接用盖革-缪勒计数器、电离室或闪烁计数器测量。或者在室内使用热释光玻璃剂量计或探测器进行累积测量。参考文献[39]较详细地讨论了这几种探测器的工作原理和相对优点。

4.12. 特定放射性核素的检测和量化通常通过实验室对代表性样品的分析得出。使用碘化钠或锗探测器的 γ 能谱法是最佳的测量方法。目前高纯锗(HPGe)探测器普遍用于实验室测量或住所的就地测量[38、40、41]。

γ 辐射调查

4.13. 国家主管部门应利用室外 γ 辐射水平调查的数据,确定出土壤中的天然放射性核素对建筑居住者室内 γ 辐射照射明显的地区。如果相关室外 γ 辐射水平数据有限,国家主管部门应作出安排,开展调查。

4.14. 国家主管部门应利用建筑材料中天然放射性核素水平的调查数据,查明那些可能对室内 γ 辐射照射突出的放射性核素。如果相关建筑材料中放射性核素水平的现有数据有限,国家主管部门应作出安排,开展调查,和(或)应要求建筑材料制造商和进口建筑材料供应商向其提供此类数据。

γ 照射控制和降低

土壤 γ 辐射

4.15. 国家主管部门应考虑是否限制天然本底辐射水平特别高的地区新建筑物的建造。国际放射防护委员会[8]指出，对天然现存照射年剂量可能增加到 100 毫希沃特的干预总是正当的。“现存照射年剂量”一词包括所有来源的照射剂量，其包括建筑材料和土壤的外照射剂量，以及氡和食品中放射性核素的内照射剂量。

4.16. 地面存在的天然放射性核素导致室内高剂量率 γ 辐射的罕见情况，国家主管部门应向现有建筑物的居住者提供减少辐射照射的方法指导。包括搬迁，同时也应考虑社会和经济因素。

建筑材料的 γ 辐射

4.17. 参考文献[2]要求确定“建筑材料等商品中放射性核素所致照射的特定参考水平，……通常表示为或基于对代表人的年有效剂量，一般不超过 1 毫希沃特/年”（参考文献[2]第 5.22 段）。大约 1 毫希沃特/年的参考水平仅适用建筑材料 γ 辐射照射的剂量（即不包括建筑材料析出到室内空气中的氡-222 或氡-220 的任何额外剂量）。

4.18. 镭-226 和钍-232 及其子体和钾-40 对建筑材料 γ 辐射剂量的贡献最大。有几个国家制定了控制建筑材料中天然放射性核素含量的指导方针或条例，阿克布洛姆（Akerblom）[42]指出，关于建筑材料的法规或标准主要是基于与建筑材料中的钾-40、镭-226 和钍-232 活度浓度相关的活度浓度指数。制定和实施活度浓度指数的方法因国家而异。对于高析出率系数的建材，国家主管部门应增加建材中镭含量的标准，以控制氡的析出率。

4.19. 国家主管部门应建立一个确定建筑材料天然放射性核素的含量是否符合参考水平的程序。以下列出了一个关于 γ 辐射外照射参考水平为 1 毫希沃特的确定程序例子。如果在一个使用不同参考水平值的国家，则该国家对受限建筑材料的确定过程与此不同。这一过程要求测定建筑材料中天然放射性核素的活度浓度，然后评价活度浓度指数。活度浓度指数与使用特定建筑材料建造的建筑物中的 γ 辐射照射量有关。活度浓度指数是一种筛选工具，用于确定可能需要限制的建筑材料。

4.20. 下式[18]¹⁰给出了国家主管部门应考虑的生活度浓度指数 I 的一个例子:

$$I = \frac{C_{\text{Ra}}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{Th}}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{K}}}{3000 \text{ Bq/kg}} \quad (1)$$

其中:

C_{Ra} 是建筑材料中镭-226 的生活度浓度, 单位为贝可/公斤;

C_{Th} 是建筑材料中钍-232 的生活度浓度, 单位为贝可/公斤;

C_{K} 是建筑材料中钾-40 的生活度浓度, 单位为贝可/公斤。

4.21. 如混凝土和砖块建筑材料的放射性生活度浓度指数 I 小于 1, 或者如外表装修材料的瓷砖放射性生活度浓度指数 I 小于 6, 则建筑材料 γ 放射性核素的年有效剂量将很可能小于 1 毫希沃特的参考水平。在这种情况下, 通常不应限制这些建筑材料的使用。经验表明, 就大多数建筑材料而言, 相应的生活度浓度指数值没有超标[18、43]。对于分别超过 $I=1$ 或 $I=6$ 值的建筑材料, 在使用前需要进一步评定。

4.22. 对于需进一步评定的建筑材料, 国家主管部门应要求计算因建筑材料而产生的 γ 辐射外照射剂量。此类评定应基于相关材料以典型使用方式的情况。剂量评定应考虑到本地土壤中天然放射性核素室外的本底辐射水平。评定建议由建筑材料制造商编写, 并提交国家主管部门。

4.23. 附件 VI[18]提供了一个建筑材料 γ 辐射外照射剂量计算方法实例。

4.24. 对于需要评定的建筑材料, 应将计算的因建筑材料 γ 辐射外照射有效剂量 E 与参考水平进行比较。如果计算的有效剂量小于 1 毫希沃特/年的参考水平, 则不应限制建筑材料的使用。如果计算的有效剂量超过 1 毫希沃特/年的参考水平, 国家主管部门应决定采取包括对限制相应建筑材料的特定用途的合理措施。

¹⁰ 生活度浓度指数的推导和生活度浓度指数上限值的推导(见第 4.21 段)见参考文献[18]附件 I。

4.25. 在一些传统上使用了几十年或几百年含有天然放射性核素的天然建筑材料，其活度浓度可能超过 γ 辐射外照射年有效剂量 1 毫希沃特，在这种情况下，应评价在新建筑中使用降低照射材料所造成包括财务和社会的费用。

4.26. 图 2 描述了相关建筑材料 γ 辐射外照射的控制流程建议。

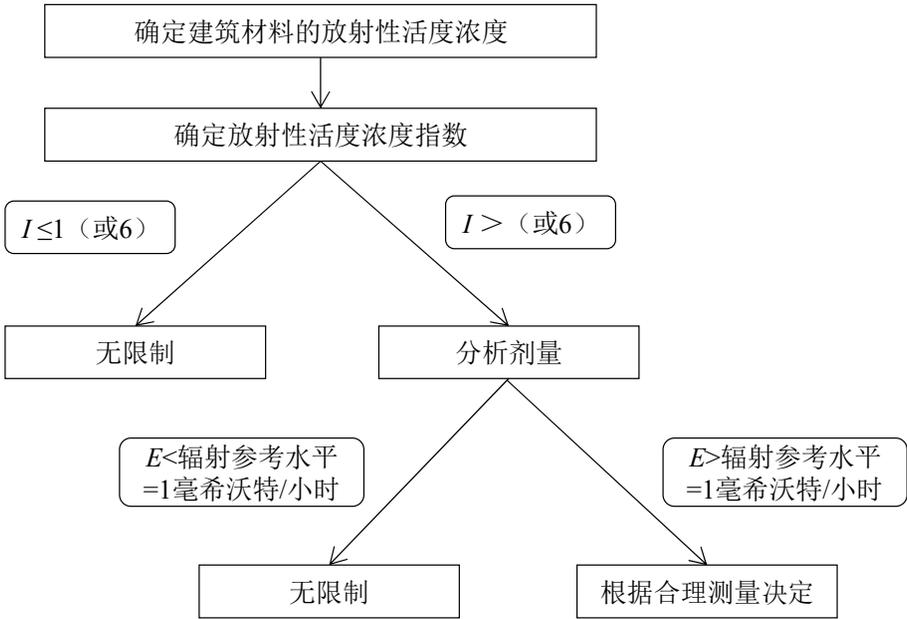


图 2. 建筑材料 γ 辐射外照射控制流程图。

4.27. 粉煤灰和磷石膏等天然存在放射性物质工业的残渣常用于做不同类型的建筑材料。对人造建筑材料应采用基于活度浓度指数测定或无法确定成分的采用替代方法开展剂量评定。如果残渣可能含有镭-226、钍-232 和钾-40 以外的天然放射性核素，也应评定这些放射性核素造成的照射。进一步，如果建筑材料中钍-232 和镭-228 放射性核素活度浓度处于非平衡状态，应用镭-228 活度浓度替代公式 (1) 中钍-232 活度浓度。

现有建筑中建筑材料 γ 辐射

4.28. 对于因建筑材料中放射性核素导致 γ 照射的年有效剂量水平较高的已有建筑物可能需要采取防护措施。如果认为有必要，国家主管部门应制定已有建筑中建筑材料产生的 γ 辐射的参考水平。如参考文献[2]要求，国家主管部门确保防护措施正当性，防护和安全最优化（参考文献[2]要求 48）。同时要求国家当局确保这种情况的防护策略管理与居住于建筑的辐射风险相称（参考文献[2]第 5.7 段）。

4.29. 在建筑物中发现高水平的 γ 辐射情况下，可通过在墙壁或地板表面上铺设屏蔽材料来降低 γ 辐射水平。各种屏蔽材料对 γ 辐射的衰减见表 1[44]。

4.30. 国际放射防护委员会[8]指出，对现存照射年剂量增加到 100 毫希沃特的干预是正当的。国家主管部门应考虑有效剂量水平超过 100 毫希沃特/年的居所和其他居留因子高的建筑物采取强制性保护行动的要求。一种可能而极端的干预措施是拆除建筑物和重新安置居住者[8]。这一行动显然会带来严重的经济和社会代价，应该在充分认真考虑的情况下采取。

表 1. 屏蔽材料性能：不同衰减系数所需相应材料的厚度（毫米）[44]

| 屏蔽材料 | 给定减弱系数在 0.1—0.9 间所需屏蔽材料厚度 (毫米) | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 减弱系数 | | | | | | | | |
| | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
| 铅 ($\rho=11300$ 公斤/立方米) | 0.9 | 2.3 | 4.0 | 6.3 | 9.3 | 13 | 18 | 26 | 38 |
| 铁 ($\rho=7800$ 公斤/立方米) | 6.1 | 11 | 17 | 23 | 29 | 37 | 46 | 59 | 81 |
| 重晶石 ($\rho=3300$ 公斤/立方米) | 12 | 24 | 37 | 50 | 65 | 83 | 100 | 130 | 180 |
| 重晶石 ($\rho=2800$ 公斤/立方米) | 18 | 34 | 50 | 66 | 84 | 100 | 130 | 160 | 220 |
| 混凝土 ($\rho=2300$ 公斤/立方米) | 30 | 50 | 69 | 89 | 110 | 130 | 160 | 200 | 270 |
| 砖片 ($\rho=1800$ 公斤/立方米) | 46 | 72 | 100 | 130 | 160 | 190 | 230 | 280 | 370 |

参 考 文 献

- [1] 欧洲原子能联营、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、国际海事组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《基本安全原则》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 SF-1 号，国际原子能机构，维也纳（2006 年）。
- [2] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织，《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号，国际原子能机构，维也纳（2014 年）。
- [3] 联合国《电离辐射的来源和影响》（2008 年向大会报告），原子辐射效应科学委员会，联合国，纽约（2010 年）。
- [4] 国际放射防护委员会《国际放射防护委员会 2007 年建议书》，国际放射防护委员会第 103 号出版物，爱思唯尔，牛津（2007 年）。
- [5] 国际放射防护委员会《住宅和工作场所氡-222 的防护》，国际放射防护委员会第 65 号出版物，培格曼出版社，牛津（1993 年）。
- [6] 国际放射防护委员会《氡及其子体的肺癌危险与关于氡的声明》，国际放射防护委员会第 115 号出版物，爱思唯尔，牛津（2010 年）。
- [7] 世界卫生组织《世界卫生组织室内氡手册：公共卫生观点》，世界卫生组织，日内瓦（2009 年）。
- [8] 国际放射防护委员会《在持续辐射照射情况下公众的防护》，国际放射防护委员会第 82 号出版物，培格曼出版社，牛津和纽约（2000 年）。
- [9] 世界卫生组织、联合国粮食及农业组织、联合国粮食及农业组织和/世界卫生组织联合食品标准计划、食品法典委员会，《食品污染物和毒素通用标准》附表 1—放射性核素，CODEX STAN 193-1995，CAC，罗马（2013 年）。
- [10] 世界卫生组织《饮用水质量标准》第四版，世界卫生组织，日内瓦（2011 年）。

- [11] 国际原子能机构《职业辐射防护》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 RS-G-1.1 号，国际原子能机构，维也纳（1999 年）。
- [12] 国际原子能机构《放射性流出物排入环境的监管控制》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 WS-G-2.3 号，国际原子能机构，维也纳（2000 年）。
- [13] 国际原子能机构《矿石开采和冶炼中放射性废物的管理》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 WS-G-1.2 号，国际原子能机构，维也纳（2002 年）。
- [14] 国际原子能机构《促进安全的政府、法律和监管框架》，国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 1 号，国际原子能机构，维也纳（2010 年）。
- [15] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第八部分：建筑物初始和附加调查方法》（ISO 11665-8:2012），国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [16] 联合国《电离辐射效应（2006 年向大会报告），附件 E：家庭和工作场所氡的影响源评定》，原子辐射效应科学委员会，联合国，纽约（2009 年）。
- [17] 联合国《电离辐射的来源和影响》（向大会报告），附件 B：自然辐射源的照射，原子辐射效应科学委员会，联合国，纽约（2000 年）。
- [18] 欧洲委员会《辐射防护》第 112 号《关于建筑材料天然放射性的辐射防护原则（1999 版）》，http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/112.pdf
- [19] INGERSOLL, J.G., “美国建筑材料中放射性核素含量和氡释放率的调查”，《保健物理》第 45 期（1983 年）第 363—368 页。
- [20] JENSEN, C.L., STRAND, T., RAMBERG, G., RUDEN, L., ANESTAD, K., “挪威氡测绘和修复计划”，国际放射防护委员会，马德里（2004 年）。
- [21] EK, B., THUNHOLM, B., OSTERGREN, I., FALK, R., MJONES, L., “天然存在放射性物质：饮用水中的砷和其他金属（2008 年）”，<http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Rapport/Stralskydd/2008/ssrapp-2008-15.pdf>（英文概要）。

- [22] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222, 第四部分: 用被动取样和延迟分析测定平均放射性浓度的综合测量方法》(ISO 11665-4:2012), 国际标准化组织, 日内瓦 (2012 年)。
- [23] 爱尔兰辐射防护研究所, “氡浓度高于国家参考水平的爱尔兰房屋核实和治理的行动计划 (2006 年)”,
http://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_Rad_Action_Plan_06.pdf
- [24] 核安全局, “2011—2010 年氡相关风险管理国家行动计划 (2012 年)”,
<http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/News-releases/ASN-s-national-action-plan-for-management-of-the-radon-risk>
- [25] 瑞士联邦公共卫生局《国家氡行动计划, 2012—2020 (2011 年)》,
http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11649/index.html?lang=en&download=NHZLpZeg7t,Lnp6I0NTU042I2Z6ln1ad1I1Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCKdH14f2ym162epYbg2c_JkKbNoKSn6-
- [26] 美国环境保护署, “保护人民和家庭免受氡污染: 一项拯救生命的联邦行动计划 (2011 年)”,
http://www.epa.gov/radon/pdfs/Federal_Radon_Action_Plan.pdf
- [27] 国际放射防护委员会《氡照射的放射防护》, 国际放射防护委员会第 126 号出版物, 爱思唯尔, 牛津 (2014 年)。
- [28] 国际放射防护委员会《放射防护最优化》, 国际放射防护委员会第 101b 号出版物, 爱思唯尔, 牛津 (2006 年)。
- [29] 国际标准化组织《实验室能力试验和校准的一般要求》(ISO/IEC 17025:2005), 国际标准化组织, 日内瓦 (2005 年)。
- [30] NEZNAL, M., NEZNAL, M., ŠMARDÁ, J., “布拉格查布里地面氡渗入风险”, 《捷克斯洛伐克氡调查》(Barnet, I., 编), 第二卷第 34—39 页, 捷克地质调查局, 布拉格 (1991 年)。
- [31] NEZNAL, M., NEZNAL, M., MAOTLIN, M., BARNET, I., MIKSOVA, J., “评定建筑工地氡风险的新方法”, 《捷克地质调查特别报告第 16 篇》, 捷克地质调查局, 布拉格 (2004 年)。
- [32] McLAUGHLIN, J., “室内环境中钍及其后代的研究概况”, 《辐射防护剂量学》第 141 期 (2010 年) 第 316—321 页。

- [33] GUO, Q., SHIMO, M., IKEBE, Y., MINATO, S., “日本民居中钍和氡子代浓度的研究”,《辐射防护剂量学》第 45 期(1992 年)第 357—359 页。
- [34] TOKONAMI, S., 等,“山西和陕西省窑洞居民氡和钍的照射”,《辐射研究》第 162 期(2004 年)第 390—396 页。
- [35] YAMASAKI, T., LIDA, T., “日本用 α 势能监控仪测量钍子代浓度”,《保健物理》第 68 期(1995 年)第 840—844 页。
- [36] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 土壤, 第一部分: 通用导则和定义》(ISO 18589-1:2005), 国际标准化组织, 日内瓦(2005 年)。
- [37] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 土壤, 第二部分: 取样策略选择、取样和样品预处理导则》(ISO 18589-2:2007), 国际标准化组织, 日内瓦(2007 年)。
- [38] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 土壤, 第三部分: γ 辐射放射性核素的测量》(ISO 18589-3:2007), 国际标准化组织, 日内瓦(2007 年)。
- [39] KNOLL, G.F.,《辐射检测与测量》第四版, J. 威利父子公司, 纽约(2011 年)。
- [40] 国际电工组织《核仪器仪表 — 放射性核素 γ 射线发射率的测量 — 锗光谱计的校准和使用》(IEC 61452), 国际电工委员会, 日内瓦(1995 年)。
- [41] 国际电工组织《辐射防护仪器仪表: 环境中离散放射性核素的测量 — 使用锗探测器的现场光子光谱测定系统》(IEC 61275), 国际电工委员会, 日内瓦(2013 年)。
- [42] ÅKERBLOM, G., “氡法律和国家导则”, SSI 报告第 99:18 号, 瑞典辐射防护研究所, 斯德哥尔摩(1999 年)。
- [43] TREVISI, R., RISICA, S., D' ALESSANDRO, M., PARADISO, D., NUCCETELLI, C., “欧盟建筑材料中的天然放射性: 数据库和放射性重要性的估计”,《环境放射性杂志》第 105 期(2012 年)第 11—20 页。
- [44] 捷克标准办公室《建筑材料的氡和 γ 辐射防护》(CSN 73 0602), 捷克标准、计量和试验办公室(2006 年)。

附件 I

氡-222 高发区氡气调查与浓度图绘制

I-1. 氡的公共健康风险控制措施必须根据该国室内氡浓度信息来确定。部分国际权威机构指出，在确定人口的氡照射量[I-1、I-2]时，需要了解氡的浓度及其地域差异。这意味着需要开展氡调查和绘制氡-222 浓度图。世界卫生组织已对多个国家开展了氡调查[I-3]。

I-2. 室内高浓度的氡-222 几乎来自地下的铀。在某些情况下，室内建筑材料也可能产生高浓度的氡，但这种情况并不常见。相对高浓度的氡-222 与特定类型的基岩和松散沉积物有关，例如某些富含有机质的花岗岩、磷灰石和页岩。铀含量并不是决定岩石中氡-222 释放率的唯一因素，渗透率、断裂破碎程度和风化作用也是重要因素。还需要考虑采矿等人类活动的影响。一旦氡-222 气体释放出来，其向地表的迁移就受到许多复杂过程的控制。氡-222 从土壤气体到室内空气的迁移取决于许多因素，这些因素随建筑物的不同和时间的不同而有很大的差异。

I-3. 土壤中氡-222 的浓度可能因地而异，其主要取决于岩石和土壤中铀的浓度以及地质结构内和地质结构间氡气的迁移方式[I-4]。确定建筑物内氡-222 的浓度要考虑以小得多的规模作用的同一大类因素，与个别建筑物的详细结构和使用方式之间的相互作用，如风速和风向、大气压和温度等气候因素[I-5、I-6]会导致氡-222 的浓度在不同的建筑物之间、不同的小时之间和不同的天之间会有很大的变化。住户的行为也会影响室内氡-222 的浓度。

I-4. 建筑中氡-222 的浓度取决于土壤中氡气浓度和土壤析出特性以及建筑的建造和使用方式。目前开展了土壤中氡-222 浓度与室内氡-222 浓度的关系研究。但由于没有考虑影响室内氡浓度的所有因素，目前研究的成果有限。

I-5. 因室内氡-222 浓度变化大，所以必须仔细开展氡-222 调查，才能确定各国或地区氡-222 问题的规模和性质。调查的结果最好以地图的方式表示。辛诺特（Synnott）和芬顿（Fenton）[I-7]以及迪布瓦（Dubois）[I-8]对欧洲氡-222 调查和氡-222 地图绘制进行了全面评审。鉴于结果，特别是

氡-222 地图绘制方法上巨大的差异，几乎不可能开展国家间的比较，2006 年欧洲开始做了一次大规模的氡地图测绘项目。欧洲室内氡图的临时版本（鉴于许多国家仍在进行中，所以这是一个正在开展中的项目）已经出版[I-9—I-11]。表 I-1[I-8、I-12—I-46]概述了迪布瓦描述的氡-222 的国家调查情况。自参考文献[I-8]发表以来，已经获得了大量的氡数据。许多国家还公布了其国内各区域和地方室内氡-222 浓度数据。联合国原子辐射效应委员会（UNSCEAR）最近于 2006 年[I-47]报告了全世界的数据。

表 I-1. 欧洲室内氡-222 浓度测绘方案（基于迪布瓦的调查[I-8]）

| 国家 | 参考文献 | 国家 | 参考文献 |
|-------|-------------|------------------|-------------|
| 奥地利 | [I-12] | 卢森堡 | [I-29] |
| 比利时 | [I-13] | 马耳他 | [I-30] |
| 克罗地亚 | [I-14] | 荷兰 | [I-31] |
| 塞浦路斯 | [I-15] | 挪威 | [I-32] |
| 捷克共与国 | [I-16] | 波兰 | [I-33] |
| 丹麦 | [I-17] | 葡萄牙 | [I-34] |
| 爱沙尼亚 | [I-18] | 罗马尼亚 | [I-35] |
| 芬兰 | [I-19、I-20] | 塞尔维亚 (仅伏伊伏丁那) | [I-36] |
| 法国 | [I-21] | 斯洛伐克 | [I-37] |
| 德国 | [I-22] | 斯洛文尼亚 | [I-38] |
| 希腊 | [I-23] | 西班牙 | [I-39] |
| 匈牙利 | [I-24] | 瑞典 | [I-40] |
| 爱尔兰 | [I-25] | 瑞士 | [I-41] |
| 意大利 | [I-26] | 前南斯拉夫马其顿 共和国 | [I-42] |
| 拉脱维亚 | [I-27] | 英国 | [I-43—I-46] |
| 立陶宛 | [I-28] | | |

I-6. 氡-222 调查可以基于人群，即旨提供有关氡-222 照射的人员信息，或基于地理，即关注氡-222 在不同地理区域典型浓度，而不管人群。尽管它们也相关但这两者是不同的。基于人群的调查有助于了解氡-222 照射对公众健康的影响。在决定是否需要在新建筑中采取氡-222 预防措施或现有建筑物高浓度氡-222 的检测时，都需要氡-222 地图。基于人群的调查测量如对相关地区每千座建筑物中不论这些建筑物之间的距离远近取一座建筑进行测量。而基于地理的调查中，每个地理单元必须进行固定次数的测量，而不管该单元可能含有多少个建筑物。

I-7. 所述的采样方案简单、合理。然而，一旦测量结果不是通常流程方法结果，则情况更复杂。如果测量是由业主委托和支付的，那么委托测量和非委托测量的结果可能存在社会经济差异。

I-8. 在绘制氡-222 浓度图时，有必要根据某种地理单位给出结果。如上所述，氡-222 的浓度最终取决于地质因素及建造和使用住宅的方式。如果以行政单位表示，则地图方式的用户可能最方便；例如，使用政府行政边界或简单的矩形网格。在法规方面，由地方政府边界绘制地图更为实用。潜在的物理过程表明，通过结合与同一地质单元相关的结果，可以获得更好的结果。然而，高浓度室内氡-222 在同一地质单元内也可能有明显差异。

英国氡-222 地图绘制方法示例

I-9. 以英国氡-222 分布图绘制的经验做例子。初步基于人群的调查以 10 公里方格中氡-222 平均浓度绘制地图。然而，许多方格中仍然没有氡-222 平均浓度，为制定氡-222 政策和指导氡-222[I-48]相关活动的优先级，很明显，需要更完整和详细的氡浓度分布图。因此，为绘制更详细的氡-222 地图，英国对氡-222 浓度明显偏高的地区开始了每个 5 公里的方网格内至少测量五个点的氡-222 浓度。

I-10. 上述氡-222 测量结果显示网格内的浓度分布接近对数正态分布。为了表征这种分布，只需要每个网格确定两个参数：几何平均值和几何标准偏差。如果任何一个特定的区域[I-49、I-50]测量结果不充分，就可以利用相邻区域的数据来评价这些参数。在网格内单个住宅的结果可以超过氡行动水平概率以概率图形式表示。

I-11. 在一些确认为高浓度氡-222 的住宅开展了每 1 公里网格内平均测量 15 个氡-222 的密集测量，但结果分布极不均匀。1 公里网格的分辨率可以绘制更详细的氡-222 的浓度图。研究发现因为在更细的比例尺上测量结果分布明显不均匀，5 公里网格分辨率的氡-222 浓度图绘制方法不适用于 1 公里网格分辨率氡-222 浓度图绘制。为此为 1 公里网格氡-222 浓度图[I-51]绘制开发了一种新的数据分析方法。

I-12. 英国氡-222 浓度图绘制首先按矩形网格正方形分组的氡-222 测量结果。绘制氡-222 浓度的图，其中属于同一地质单元的所有氡-222 测量值组合在一起，并作为单一分布处理[I-52]。而单元边界取自数字地图。

I-13. 基于网格和地质两种绘图方法各有优缺点。由于室内高浓度氡-222 的潜在可能性在地质单元之间具有明显差异，按地质单元对氡-222 浓度的结果分组是一种显而易见的方法。然而，室内氡-222 浓度相同地质结构往往也会存在较大的差异，而地质绘图忽略了这种变化。虽然方形网格绘图忽略了不同地质结构之间的差异，但它可以揭示未出现在氡-222 地质图上的地质结构内的变化。

I-14. 为了确定是否有可能将不同的地质和方形网格氡-222 浓度绘图结合起来，首先将住宅中氡-222 浓度的测量结果按地质单元分组。然后，采用 1 公里方形网格方法绘图，分别在每个单元内绘制室内氡-222 浓度的变化图。然后，将所有地质结构室内氡-222 浓度图合并，以覆盖整个研究范围[I-53]。

I-15. 欧洲其他国家也重视室内氡-222 浓度图的绘制程序（见表 I-1）。对一些欧洲国家绘制的氡-222 浓度图进行了评审[I-7]。美国相应也有氡-222 浓度分布图绘制经验[I-54]。过去几年来，绘图技术有了巨大发展，出现了易用和方便的地理信息系统和地理学统计方法。

附件 I 参考文献

- [I-1] 国际放射防护委员会《住宅和工作场所氡-222 的防护》，国际放射防护委员会第 65 号出版物，培格曼出版社，牛津（1993 年）。
- [I-2] 世界卫生组织《世界卫生组织室内氡手册：公共卫生观点》，世界卫生组织，日内瓦（2009 年）。
- [I-3] ZEEB, H., “氡导则、计划和活动调查”，世界卫生组织第 WHO/HSE/RAD/07.01 号报告，世界卫生组织，日内瓦（2007 年）。
- [I-4] BARNET, I., PACHEROVÁ, P., NEZNAL, M., NEZNAL, M., “地质环境中的氡 — 捷克经验”，特别论文第 19 号，捷克地质调查局，布拉格（2008 年）。
- [I-5] ROBINSON, A.L., SEXTRO, R.G., “大气压力波动导致氡进入建筑物”，《环境科学技术》第 31 6 期（1997 年）第 1742—1748 页。
- [I-6] SUN, Q., TOKONAMI, S., YAMADA, Y., AKIBA, S., “影响室内氡水平、辐射等的主要气象参数”，《放射性同位素》第 51 3 期（2002 年）第 120—126 页。
- [I-7] SYNNOTT, H., FENTON, D., “欧洲国家氡参考水平和氡测量技术和议定书的评价”（2005 年），https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_ERRICA_Measure_Report_05.pdf
- [I-8] DUBOIS, G., “欧洲氡调查概况（2005 年）”，http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/publications/EUR_RADON.pdf
- [I-9] TOLLEFSEN, T., GRUBER, V., BOSSEW, P., DECORT, M., “欧洲室内氡图的现状”，《辐射防护剂量学》第 145 期（2011 年）第 110—116 页。
- [I-10] DECORT, M., GRUBER, V., TOLLEFSEN, T., BOSSEW, P., JANSSENS, A., “欧洲自然辐射地图集：目标、现状和未来展望”，《辐射防护装置》第 46 期（2011 年）第 S737—S743 页。

- [I-11] GRUBER, V., TOLLEFSEN, T., BOSSEW, P., DECORT, M., “欧洲室内氡图及其他”,《喀尔巴阡地球与环境科学杂志》第 8 期(2013 年)第 169—176 页。
- [I-12] FRIEDMANN, H. 等,“奥地利氡项目”,《整体环境科学》第 272 1—3 期(2001 年)第 211—212 页(摘要)。
- [I-13] VANMARCKE, H., MOL, H., PARIDAENS, J., EGGERMONT, G., “暴露在电离辐射下的比利时人口”, IRPA11:第 11 届国际辐射防护协会国际会议(国际会议论文集,马德里,2004 年) SENDA, 马德里(2004 年)。
- [I-14] RADOLIC, V. 等,“克罗地亚室内氡水平国家调查”,《核放射化学研究杂志》第 269 期(2006 年)第 87—90 页。
- [I-15] SARROU, I., PASHILIDIS, I., “塞浦路斯的氡水平”,《环境放射性杂志》第 68 期(2003 年)第 269—277 页。
- [I-16] HULKA, J., THOMAS, J., “国家氡计划:捷克共和国的 20 年经验”, IRPA11:第 11 届国际辐射防护协会国际会议(国际会议论文集,马德里,2004 年) SENDA, 马德里(2004 年)。
- [I-17] ANDERSEN, C.E., ULBAK, K., DAMKJÆR, A., KIRKEGAARD, P., GRAVESEN, P., “绘制丹麦室内氡-222 图:第 2 次全国调查中的统计模式的设计和试验”,《环境科学》第 272 1—3 期(2001 年)第 231—241 页。
- [I-18] PAHAPILL, L., RULKOV, A., RAJAMÄE, R., ÅKERBLUM, G., “国家氡调查结果:爱沙尼亚住宅中的氡”, SSI 报告第 2003:16 号,瑞典辐射防护局,斯德哥尔摩(2003 年)。
- [I-19] VALMARI, T., MÄKELÄINEN, I., REISBACKA, H., ARVELA, H., “索门氡岩溶—芬兰氡图集”, STUKA245, Oy Edita Ab.伊迪达公司,赫尔辛基(2010 年)。
- [I-20] MÄKELÄINEN, I., VALMARI, T., REISBACKA, H., KINNUNEN, T., ARVELA, H., “20 世纪至 21 世纪芬兰家庭室内氡和建筑实践”,第三届欧洲国际辐射防护协会大会(国际会议论文集,赫尔辛基,2010 年),北欧辐射防护协会,赫尔辛基(2011 年)第 561—569 页。

- [I-21] BILLON, S., 等, “法国人口受氡、地面 γ 和宇宙射线的照射”, 《辐射防护剂量学》第 113 3 期 (2005 年) 第 314—320 页。
- [I-22] LEHMANN, R., KEMSKI, J., SIEHL, A., STEGEMANN, R., VALDIVIMANCHEGO, M., “德国室内氡浓度的区域分布”, 《国际会议丛书》第 1225 期 (2002 年) 第 55—61 页。
- [I-23] CLOUVAS, A., XANTHOS, S., ANTONOPOULOS-DOMIS, M., “希腊住宅室内氡和属地 γ 能谱测量的联合研究”, 《辐射防护剂量学》第 103 4 期 (2003 年) 第 363—366 页。
- [I-24] HÁMORI, K., TÓTH, E., KÖTELES, G., PÁL, L., “匈牙利住宅氡水平 (1994—2004 年)”, 总第 48 期 (1994 年) 第 283—299 页。
- [I-25] FENNELL, S.G. 等, “爱尔兰国家氡调查: 住宅中的氡”, RPI02/1, 爱尔兰辐射防护研究所, 都柏林 (2002 年)。
- [I-26] BOCHICCHIO, F. 等, “意大利室内氡代表性国家调查结果”, 《保健物理》第 71 5 期 (1996 年) 第 741—748 页。
- [I-27] DAMBIS, M., “拉脱维亚住宅中的氡, 辐射与社会, 理解辐射风险” (国际会议论文集, 巴黎, 1994 年) 国际原子能机构, 维也纳 (1996 年) 第 379—382 页。
- [I-28] MORKUNAS, G., ÅKERBLUM, G., “立陶宛氡调查结果”, 《整体环境科学》第 272 期 (2001 年) 第 243—244 页 (摘要)。
- [I-29] KIES, A., FEIDER, M., BIELL, A., “卢森堡大公国室内氡浓度”, 《比利时辐射防护协会年刊》第 19 期 (1994 年) 第 189—201 页。
- [I-30] MIFSUD, I., SAMMUT, M., “地方住宅氡水平调查”, 《科学》第 4 期 (1999 年) 第 40—41 页。
- [I-31] STOOP, P., GLASTRA, P., HIEMSTRA, Y., DEVRIES, L., LEMBRECHTS, J., “荷兰第二次国家住宅氡调查结果”, RIVM 第 610058006 号报告, 国家公共卫生与环境研究所, 荷兰比尔托芬 (1998 年)。

- [I-32] STRAND, T., GREEN, B.M.R., LOMAS, P.R., “挪威住宅中的氡”,《辐射防护剂量学》第 45 期 (1992 年) 第 503—508 页。
- [I-33] STAWARZ, O., ISAJENKO, K., LIPINSKI, P., MAMONT-CIESLA, K., “Rzeszow 地区住宅中氡浓度调查 — 旨在完成波兰氡地图集的缺失数据”, 活动报告 2008—2009 年, 第 25—31 页, 放射防护中心实验室, 华沙 (2010 年)。
- [I-34] FAÍSCA, M.C., TEIXEIRA, M.M.G.R., BETTENCOURT, A.O., “葡萄牙室内氡浓度全国调查”,《辐射防护剂量学》第 45 期 (1992 年) 第 465—467 页。
- [I-35] CUCULEANU, V., SONOC, S., Georgescu, M., “罗马尼亚氡和钍子体的放射性”,《辐射防护剂量学》第 45 期 (1992 年) 第 483—485 页。
- [I-36] CURCIC, S., 等, “伏伊伏地那第 1 张氡图”, IRPA11:第 11 届国际辐射防护协会国际会议 (国际会议论文集, 马德里, 2004 年), SENDA, 马德里 (2004 年)。
- [I-37] VICANOVÁ, M., DURCÍK, M., NIKODEMOVÁ, D., “斯洛伐克氡辐射负载 (1999 年)”,
http://www.IAEA.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/017/30017847.pdf
- [I-38] KRIŽMAN, M., ILIC, R., SKVARC, J., JERAN, Z., “斯洛文尼亚住宅室内氡浓度调查”, IRPA 地区会议记录 (波托洛兹学术会议论文, 1995 年), (GLAVIC-CINDRO, D., 编), J. 卢布尔雅那斯特凡学院 (1995 年) 第 66—70 页。
- [I-39] QUINDÓSPONCELA, L.S. 等, “西班牙自然外 γ 辐射图 (MARNA) 和室内氡水平”。《世界环境》第 29 期 (2004 年) 第 1091—1096 页。
- [I-40] 瑞典氡委员会《关于瑞典新氡方案的建议》, 瑞典氡委员会 2000 年报告 SOU001:7, 瑞典政府办公室, 斯德哥尔摩 (2001 年)。
- [I-41] 瑞士联邦公众卫生局《辐射防护部 2013 年度报告 (2013 年)》,
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00043/00065/02236/index.html?lang=de>

- [I-42] 共和国健康保护研究所, “生活和工作环境中的氡”, 第 40096895 号报告, 共和国健康保护研究所, 斯科普里 (1998 年)。
- [I-43] GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., BRADLEY, E.J., REES, D.M., “英格兰和威尔士的氡地图集”, 第 NRPB-W26 号报告, 国家辐射防护委员会, 奇尔顿 (2002 年)。
- [I-44] MILES, J.C.H. 等, “英格兰和威尔士参考地图集”, 第 HRPD-033 号报告, 卫生防护局, 迪科特 (2007 年)。
- [I-45] MILES, J.C.H. 等, “苏格兰氡指示性地图集”, 第 HPCRCE-023 号报告, 卫生防护局, 伦敦 (2011 年)。
- [I-46] GREEN, B.M.R., LARMOUR, R., MILES, J.C.H., REES, D.M., LEDGERWOOD, F.K., “北爱尔兰住宅中的氡”, 第 HRPD-061 号报告, 卫生防护局, 奇尔顿 (2009 年)。
- [I-47] 联合国《电离辐射效应 (2006 年向大会报告), 附件 E: 家庭和工作场所氡的影响源评定》, 原子辐射效应科学委员会, 联合国, 纽约 (2009 年)。
- [I-48] KENDALL, G.M., GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., DIXON, D.W., “英国氡规划的进展”, 《辐射防护》第 25 4 期 (2005 年) 第 475—492 页。
- [I-49] MILES, J.C.H., “绘制超过氡参考水平的住房存量比例图”, 《辐射防护剂量学》第 56 期 (1994 年) 第 207—210 页。
- [I-50] MILES, J.C.H., “用室内氡数据的对数正态模式绘制氡易发区”, 《保健物理》第 74 期 (1998 年) 第 370—378 页。
- [I-51] MILES, J.C.H., “利用室内氡测量绘制氡易发区地图”, 《危害材料杂志》第 61 期 (1998 年) 第 53—58 页。
- [I-52] APPLETON, J.D., BALL, T.K., “氡地质潜势图绘图”, 《地质环境绘图: 方法、理论和实践》(BOBROWSKY, P.T., 编), 巴尔克马, 鹿特丹 (2002 年) 第 577—613 页。
- [I-53] MILES, J.C.H., APPLETON, J.D., “绘制地质单元之间和内部氡势的变化图”, 《辐射防护》第 25 期 (2005 年) 第 257—276 页。

[I-54] 美国环境保护署《氡带图》（2012年版），
<http://www.epa.gov/radon/zonemap.html>

附件 II

氡-222 和氡-220 的测量技术

氡-222 的测量技术

II-1. 吸入氡及其子体的健康风险将取决于吸入空气中的放射性核素混合物。衰变释放出 α 粒子的放射性核素尤为重要，因为 α 粒子在体内造成的生物危害比 β 粒子或 γ 辐射更大。通常是氡子体比氡气本身造成危害大；因为氡子体沉积在肺里，而大部分吸入的氡气则会随呼吸作用被呼出。已经表明，氡气的浓度通常是危害风险相关的良好的指示因子[II-1]。虽然目前辐射防护通常要测量氡气的浓度，但氡子体测量仍然是重要的课题。

II.2. 氡照射导致的患肺癌的风险取决于照射累积量。如果能通过快速测量来估计氡照射将会十分方便。然而，因为氡的浓度会随每天时差、天与天月与月间时间不同而变化，有时变化较大，同时变化还会受气候因素和其他因素[II-2—II-4]影响，使得氡的快速测量存在误导性。氡浓度的现场[II-5]、短期[II-6]或连续[II-7]测量可用于筛查和诊断，或确定氡浓度的时间变化。然而，要评定健康风险，就必须有氡的长期平均活度浓度或长期以来累积的氡平均活度浓度信息。理想情况下，氡浓度的测量需要持续一整年，以涵盖可能存在的任何季节性变化。氡的年平均活度浓度在不同年份之间变化[II-8]。然而，如果探测器在住户家中放置如此长的时间，则可能会被移动错位；探测器的性能可能会出现问題，住户可能不愿意为测量结果等待如此久。由于上述原因，测量通常是在几个月的时间内完成的，年平均数是根据典型的季节变化使用修正系数估算得到。如参考文献[II-9—II-12]作者研究了氡-222 浓度的季节变化。发现氡-222 浓度在较冷的月份相对较高，相应该国在冬季开展氡-222 调查是保守的。

II.3. 氡测量重要的是遵循精心设计和按照详细测量规范[II-4]。国际上，国际标准化组织发布了氡-222 试验方法标准，该标准分不同部分，每一部分都适用于特定情况和目标，并考虑到数据质量的目标[II-3、II-5—II-7、II-13—II-20]。例如，在美国环境保护署发布了建议[II-21]，其他国家也提供了指导，例如英国[II-22]和法国[II-23、II-24]。大多数国家，建议是在几个月内测量氡-222 浓度，以评定氡照射情况并与参考水平进行比较。然而，如

果在解释结果时遵循严格的规范，则可以使用较短时间的测量。该方法已在一些国家[II-21、II-25]使用，它可以快速确定氡-222 活度浓度是很高还是很低。然而，这种测量结果目前不能用于与参考水平的比较。在任何给定建筑物中，氡-222 的活度浓度也可能有显著的年份差异[II-26]。然而，除进行流行病学调查或研究目的，否则开展全年的测量[II-16]通常不具有可行性。

II-4. 以下各部分简要介绍各种氡-222 探测器。以下探测器都是通过探测氡-222 或其子体发出的 α 辐射或 γ 辐射实现测量的。关于氡-222 测量技术详见出版的参考文献[II-20、II-27]。

II-5. 氡-222 探测器可分为能动式和非能动式两类。非能动式探测器不需要电力，在大规模应用中具有明显的优势。大多数住宅中氡-222 浓度的测量是用固体径迹探测器或活性炭探测器进行的，这两种探测器都是非能动式探测器。

固体径迹探测器

II-6. 固体径迹探测器通常由一个放在小容器中的塑料探测器组成。氡气扩散到容器中并发生衰变，放出 α 粒子，在塑料探测器中留下损伤痕迹。为了确定探测器所受氡的照射量，塑料被放入腐蚀性溶液中蚀刻，在被 α 粒子辐射损坏的地方会产生径迹。例如，径迹可以在显微镜下观察或用载玻片扫描仪自动计数。最常用的探测器塑料是聚二甘醇碳酸酯（PADC，也称为 CR-39）。盖革在参考文献[II-28]中首次描述了这一原理。参考文献[II-29]详细讨论了固体核径迹探测器的应用，国际标准描述了其用途[II-6]。

II-7. 固体径迹探测器体积小、价格便宜、结构简单、无毒、无害。它可以通过邮局寄出，并附有安放和寄回的提示。在住宅中通常使用两个固体径迹探测器进行测量，以评定居住者的受照射情况；一个放在住人的卧室里，另一个放在主要的起居室内。通常至少放置三个月，然后返回测量。一些国家还制定了通过将探测器放置在最低层的房间中，以及地下室或建筑物下面的地窖中的替代放置方法，以评定氡对居住者的影响以及地下室氡水平可能对居住者的影响。

II-8. 大多数固体径迹探测器都有过滤介质，以防止氦子体进入产生影响。然而，有些探测器是开放设计的，既能探测氦气，又能探测氦子体。这似乎是一个优点，但事实上，这种开放式探测器对许多因素（如阳光、灰尘）非常敏感，这些因素会影响子体探测的比例。开放式探测器也可以在测量期间关闭，因此重要的是记录照射时间（即探测器打开的时间段）。

II-9. 由于氦-220 引起的辐射会影响一些封闭和所有开放的固体径迹探测器的结果[II-30]。这是一个缺点，因为它影响了它们测量氦-222 浓度的准确性。封闭式固体径迹探测器氦-222 进入的半减周期优选为较氦-220(55.6 秒)半衰期时间较长，较氦-222 (3.82 天)半衰期相比较短。如果探测器满足这一标准，氦-220 在进入探测器之前几乎将完全衰变，但氦-222 在进入探测器之前不会明显衰变减少。

II-10. 固体径迹探测器有许多优点，但在使用时必须注意质量保证。因为一批与另一批塑料对 α 粒子损伤的反应有明显差异以及对刻蚀条件也非常敏感[II-31]。由于这些原因，实验室新生产和加工固体径迹探测器时往往难以达到高精度标准要求。从经过验证或认可的实验室购买固体径迹探测器的全套测量服务，可以最大限度地减少误差。除大规模的氦-222 测量外，该方式是通常比新建固体径迹探测器实验室方案便宜。购买固体径迹探测器或交钥匙服务时需要确保在氦-222 非能动式探测器的国际比对中一致性良好，且符合国家氦-222 测量标准[II-22]。

活性炭探测器

II-11. 活性炭探测器也称为活性炭吸附装置。它由一个吸附空气中的氦-222 的活性炭及其小容器组成，活性炭通常覆盖扩散屏障的滤网。在现场放置完后，将探测器密封并发回实验室使用闪烁探测器进行分析。常规的分析方法是测量短寿命氦-222 子体的 γ 辐射[II-6]。

II-12. 氦-222 的半衰期为 3.82 天，活性炭吸附的氦-222 在其半衰期内使用可以用于一般室内氦浓度测量，超过一周及更长后就难以保证氦浓度的测量精确。此外，吸附在活性炭上的氦-222 也会再损失。Luetzelschwab 等人[II-32]调查了活性炭剂量计的响应，结果显示在没有扩散屏障时活性炭受温度和湿度水平影响大，有效时间不超过两天。如果使用扩散屏障，则响应能

改善。测量的持续时间超过一周。胡什（Hursh）[II-33]初步描述了活性炭吸附氡-222 测量方法的原理。

II-13. 活性炭探测器不适合长期测量，但可用于筛查；例如，衡量预防措施和纠正措施的有效性，或衡量建筑中氡-222 浓度是否有大问题。为了更好地估计氡-222 的长期照射，需要进行确认性长期测量。

驻极体电离室

II-14. 驻极体电离室包含一个聚四氟乙烯（PTFE）驻极体片，该驻极体片工作时充电，工作电压通常约为 700 伏[II-34]。驻极体维持有静电电荷，通过氡-222 及其子体发射的 α 粒子使电离室内空气电离，驻极体的这种静电电荷逐渐被中和。在测量周期的开始和结束时测量驻极体上的电荷可以计算氡-222 的浓度。在进行该计算时，必须考虑到由天然本底辐射引起的电离，因为在探测器的测量处的环境 γ 剂量率会导致驻极体的电压的下降。此外，电压响应存在非线性的，必须进行仔细的校准。通常有不同类型的驻极体和不同尺寸的腔室的探测器可选，适合几天到几个月时间范围的测量[II-6]。

II-15. 驻极体电离室需要小心处理，因为掉落或辐射照射驻极体的敏感表面会导致部分或全部放电，从而导致氡-222 浓度高估。驻极体电离室也对环境条件敏感，如空气压力或空气湿度过高，会导致内表面冷凝水。通常驻极体电离室不太大，但因它们的敏感性，特别是对机械震动的敏感性降低了其实用性，而不能通过邮寄发送。驻极体探测器通常用于筛查和诊断测量。通常不适用于大规模测量。

氡连续监控仪

II-16. 各种电子式氡连续监控仪通过空气采样或扩散方法收集空气中氡及其子体到探测灵敏体，采用能谱法或非能谱法进行测量。国际标准[II-7]给出了使用氡连续监控仪的试验方法。氡气监控时，用滤膜过滤掉采样空气中的氡子体和灰尘。同时滤膜也可用于氡子体的准连续测量。选用合理的测量周期连续测量，可以测得氡浓度随时间的变化。

II-17. 如果需要精确测量，特别是低浓度氡测量，首选脉冲电离室[II-35]。脉冲电离室因昂贵且复杂，不宜大规模使用。然而，如果要研究建筑内详细氡浓度的影响因素，使用脉冲电离室则非常有用。但因为使用能动采样测量方法所需工作人员时间和数据分析方面费用昂贵，因此通常仅用于诊断或研究。

氡-222 回顾测量

II-18. 氡-222 的回顾测量技术是利用非能动式 α 径迹探测器估算室内沉积在合适的玻璃表面上的氡-222 衰变产物钋-210 表面活度的方法[II-36]。通常使用两种 α 径迹探测器：一种是由聚二甘醇碳酸酯制成，通常称为 CR-39，另一种是由硝酸纤维素制成，商业名称 LR-115。LR-115 探测器响应 1.2—4.8 兆电子伏特范围内的 α 粒子，但不会记录沉积在玻璃中的钋-210 发射的 5.3 兆电子伏特的 α 粒子；同时，产生的轨迹与玻璃上固有的 α 放射性成正比。CR-39 探测器记录了沉积在玻璃表面钋-210 的放射性和玻璃自身的固有放射性所产生的径迹。两个探测器之间的轨迹密度的差异可以对玻璃表面上沉积的钋-210 和第一衰变产物钋-218（主要是纳米形式）进行估计。通过这种方法，可以在玻璃的寿命期内估计室内氡-222 的衰变。

II-19. 根据测量沉积在玻璃表面的钋-210 的放射性、玻璃的寿命和相关室内参数（例如气溶胶的平均浓度、通风速率）信息，可以使用合理的模式来评估照射玻璃的氡-222 的平均浓度。

II-20. 随住户搬迁的玻璃可以提供有关住户氡-222 照射的历史，因而选择此类玻璃具有合理性。通常住户的照片之类的物品可以提供准确的日期，是合适的选择。

II-21. 氡-222 照射回顾性评定的另一种方法是评定入射在光盘上的 α 粒子损伤[II-37、II-38]。

氡-220 测量技术

II-22. 由于氡-220（55.6 秒）的半衰期很短，氡-220 与其子体核素之间不平衡。从辐射防护而言，测量氡-220 子体的浓度比测量氡-220 气的浓度更方便、容易和合适，且更有意义。对于在住宅和其他室内外环境中，氡-220 气

体与其子体之间可能难以平衡。普通建筑中的氡-220 浓度只有接触室内空气的建筑材料中的母体放射性核素浓度升高时,才有可能比较明显。一般而言,氡-220 的短半衰期降低了它从土壤中通过砖石基础向室内的迁移或扩散。此外,在室内,氡-220 气体空间分布和它的子体空间分布之间常常存在较大的差异。这主要是因为氡-220 的半衰期比它的某些子体短。这种空间分布的差异使得氡-220 平衡的评定比氡-222 更困难。

II-23. 氡-220 及其子体的测量技术有多种。这些技术主要基于探测衰变链上发射的 α 粒子,并且部分情况测量 γ 谱。常用的 α 探测器包括 ZnS (Ag) 闪烁体探测器、金硅面垒探测器、电离室、驻极体和固体径迹探测器。

II-24. 针对氡-220 气体,已开发了一种测量氡-222 和氡-220[II-39、II-40]非能动式 α 径迹探测器技术。该技术利用氡-222 和氡-220 的扩散特性的双 α 径迹探测器。其中一个探测器放置在一个较高空气交换率的腔室中,可以对氡-220 和氡-222 扩散没有明显影响。另一个探测器放置在低空气交换率腔室中,它可以有效降低氡-220 的扩散,而不会降低氡-222 的扩散。根据记录在两个探测器上的 α 径迹,并通过使用标准校准实验室确定的校准因子,从而实现氡-220 和氡-222 浓度的测量。

II-25. 测量氡-222 的驻极体电离室测量技术可改造用于测量氡-220[II-34]。

II-26. 通常也使用卢卡斯闪烁室和电离室等能动式方法测量氡-220。根据氡-222 和氡-220 衰变链半衰期不同,已经研究了通过测量脉冲时间差区分放射性核素并测量它们的活度[II-41、II-42]一些技术。该技术基于探测器中的 α 信号采样和计数时间的分析。由于钋-216 的半衰期很短(0.15 秒),氡-220 与第一代子体钋-216 主体处于长期平衡状态。因此,可以应用这些核素的探测器 α 信号与计算机延迟信号符合算法分析脉冲,估计氡-220 气体浓度。这也常用于氡-222 或其他氡-220 子体中存在 α 放射性的情况。某些类型仪器使用静电收集氡-220 子体核素并结合 α 能谱法来测定氡-220 气体的浓度[II-43]。在这类仪器中,通过测量钋-216(6.78 兆电子伏特) α 能来估算氡-220 的浓度。

II-27. 空气中氡-220 子体浓度可以通过抽气泵空气取样和使用 α 放射性延迟测量方法简单确定[II-43、II-44]。 α 测量可以通过总计数或 α 谱方法进行。氡-220 气体的浓度也可用双滤膜测量[II-45]方法测量。该方法是空气通过对氡-220 子体核素的最小平台效应金属管,金属管长度设计合适。在管的入

口和出口放置两张滤纸。第一张滤纸防止子体进入管内。气体通过金属管时发生衰变，其产物被收集在第二张滤纸上。瞬态平衡时，分析第二张滤纸上的 α 活度，确定氡-220 气体的浓度。对于住宅内取样，该方法可能需要大容量的金属管，这将导致装置不便于不同位置的移动使用。

II-28. 通常能动式测量方法取样时间短，没有长时间的数据。因此，在大规模的全国性流行病学调查方面采用能动式测量方法存在局限性。此时时间积分非能动式测量方法是首选。最新技术表明，非能动式测量的固体径迹探测器可直接记录氡-220 子体钋-212 发出的 α 辐射（在 8.78 兆电子伏特是氡-222 和氡-220 的子体核素最高的 α 能量）[II-46、II-47]。该方法使用总厚度为 71 微米的镀铝塑料膜和聚丙烯保护膜可以实现只有 8.78 兆电子伏特的 α 粒子能穿透并记录轨迹。最近新增加的一项技术是基于在径迹蚀刻片上沉积氡-220 子体，结合时间积分能动测量（通过沉积监控）来估计氡-220 的平衡当量浓度。

II-29. 美国材料试验协会的试验方法提供了一种不需要建造专门设备的相对简单的氡衰变产物浓度试验方法[II-48]。

氡诊断测量

II-30. 氡诊断是一套复杂的与氡有关和氡无关的测量方法，用于确定氡的来源和对氡迁移途径进行定性和定量分析[II-49、II-50]。附件 II 所述的不同测量技术和原理可用作评定室内和土壤中的氡诊断的基础。

附件 II 参考文献

[II-1] VANMARCKE, H., BEREEVTENS, P., POFFIJN, A., “氡与氡子体”，《保健物理》第 56 期（1989 年）第 229—231 页。

[II-2] 联合国《电离辐射效应（2006 年向大会报告），附件 E：家庭和工作场所氡的影响源评定》，原子辐射效应科学委员会，联合国，纽约（2009 年）。

- [II-3] 国际标准化组织《环境放射性测量—空气中氡-222，第一部分：氡及其短寿期衰变产物的来源和相关测量方法》（ISO 11665-1:2012），国际标准化组织，日内瓦（2012年）。
- [II-4] MILES, J.C.H., “室内氡水平的变化及其对氡测量策略的影响”，《辐射防护剂量学》第 93 期（2001 年）第 369—375 页。
- [II-5] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第六部分：活度浓度的现场测量方法》（ISO 11665-6:2012），国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [II-6] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第四部分：用被动取样和延迟分析测定平均放射性浓度的综合测量方法》（ISO 11665-4:2012），国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [II-7] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第五部分：放射性浓度的连续测量方法》（ISO 11665-5:2012），国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [II-8] STECK, D.J., “二十年来室内氡的年平均变化”，《保健物理》第 96 期（2009 年）第 37—47 页。
- [II-9] ARVELA, M., VOUTILAINEN, I., CASTREN, O., WINQVIST, K., “室内氡浓度预测与实测变化的比较”，《辐射防护剂量学》第 24 期（1988 年）第 231—235 页。
- [II-10] WRIXON, A.D., GREEN, B.M.R., LOMAS, P.R., 等，“英国住宅的天然辐射照射”，第 NRPB-R190 号，国家辐射防护委员会，奇尔顿（1988 年）。
- [II-11] MAJBORN, B., “不同子结构单户住宅氡浓度的季节变化”，《辐射防护剂量学》第 45 期（1992 年）第 443—447 页。
- [II-12] PINEL, J., FEARN, T., DARBY, S.C., MILES, J.C.H., “英国室内氡测量的季节修正系数”，《辐射防护剂量学》第 58 期（1995 年）第 127—132 页。

- [II-13] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第二部分：短寿命衰变产物平均电位 α 能浓度的综合测量方法》(ISO 11665-2:2012)，国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [II-14] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第三部分：短寿命衰变产物潜在 α 能浓度的点测量方法》(ISO 11665-3:2012)，国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [II-15] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第七部分：估算表面呼气速率的累积法》(ISO 11665-7:2012)，国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [II-16] 国际标准化组织《环境放射性测量 — 空气中氡-222，第八部分：建筑物初始和附加调查方法》(ISO 11665-8:2012)，国际标准化组织，日内瓦（2012 年）。
- [II-17] 国际电工组织《辐射防护仪器仪表：氦和氡衰变产物测量仪器仪表：第一部分：一般原则》(IEC 61577-1)，国际电工委员会，日内瓦（2006 年）。
- [II-18] 国际电工组织《辐射防护仪器仪表：氦和氡衰变产物测量仪器仪表：第二部分：氦测量仪器仪表的特殊要求》(IEC 61577-2)，国际电工委员会，日内瓦（2014 年）。
- [II-19] 国际电工委员会《辐射防护仪器仪表：氦和氡衰变产物测量仪器仪表：第三部分：氦衰变产物测量仪器仪表的特殊要求》(IEC 61577-3)，国际电工委员会，日内瓦（2011 年）。
- [II-20] CALMET, D., 等, “空气和水中氡测量的国际化工作”, 《辐射防护剂量学》第 145 期 (2011 年) 第 267—272 页。
- [II-21] 美国环境保护署《家庭中氦和氡衰变产物测量规程》(1993 年版), http://www.epa.gov/radon/pdfs/homes_protocols.pdf
- [II-22] HOWARTH, C.B., MILES, J.C.H., “住宅氡测量机构验证方案：2008 年修订版”, HPRPD-047, HPA, 奇尔顿（2008 年）。

- [II-23] 核安全局《辐射防护法律和条例汇编，第一部分：根据〈公共卫生法〉和〈劳工法〉关于保护公众、病人和工作人员免受放射性危害的摘录》，法国核安全局，法国蒙特鲁日（2013年）。
- [II-24] 核安全局《辐射防护法律和条例汇编，第二部分：根据〈公共卫生法〉和〈劳工法〉关于保护公众、病人和工作人员免受放射性危害的决议和决定》，法国核安全局，法国蒙特鲁日（2012年）。
- [II-25] IBRAHIMI, Z.-F., MILES, J.C.H., “一种用于氡短期筛选测量的刻蚀径迹探测器”，《辐射防护》第 29 期（2009 年）第 139—146 页。
- [II-26] YU, K.N., Young, E.C.M., Li, K.C., “室内氡性能影响因素研究”，《保健物理》第 71 期（1996 年）第 179—184 页。
- [II-27] GEORGE, A.C., “测量住宅中氡/钍及其后代的最新仪表综述”，《保健物理》第 70 期（1996 年）第 451—463 页。
- [II-28] GEIGER, E.L., “氡胶片剂量剂”，《保健物理》第 13 期（1967 年）第 407—411 页。
- [II-29] DURRANI, S.A., ILIĆ, R., “辐射防护应用：腐蚀径迹探测器测氡”，《地球科学与环境应用》，世界科学出版社，新加坡（1997 年）。
- [II-30] TOKONAMI, S., “为什么氡-220 测量很重要？”，《辐射防护剂量学》第 141 期（2010 年）第 335—339 页。
- [II-31] MILES, J.C.H., KENDALL, G.M., IBRAHIMI, F., HOWARTH, C.B., “氡蚀刻径迹剂量学服务的实际考虑”，《辐射防护》第 24 期（2004 年）第 165—171 页。
- [II-32] LUETZELSCHWAB, J.W., HASTINGS, L., ELLIS, S.M., “不同温湿度条件下敞面扩散阻隔罐吸附氡-222 的研究”，《保健物理》第 66 期（1994 年）第 63—71 页。
- [II-33] HURSH, J.B., “用木炭吸收法、核子法测定呼吸氡”，《核子学》第 12 1 期（1954 年）第 63—65 页。
- [II-34] KOTRAPPA, P., “《E-PERM 系统手册》第二部分 11：空气中钍的能谱测量用改良 E-PERM”，拉德电气公司，马里兰州弗雷德里克（1996 年）。

- [II-35] ISHIKAWA, T., “钍对脉冲电离室型氡探测器的影响”, 《辐射防护剂量学》第 108 期 (2004 年) 第 327—330 页。
- [II-36] McLAUGHLIN, J.P., “氡照射评定技术的回顾性应用”, 《辐射防护剂量学》第 78 期 (1998 年) 第 1—6 页。
- [II-37] PRESSYANOV, D.S., BUYSSE, J., POFFIJN, A., MEESEN, G., VANDEYNSE, A., “光盘作为氡探测器 — 该方法的实验室研究”, 《保健物理》第 84 5 期 (2003 年) 第 642—651 页。
- [II-38] PRESSYANOV, D.S., “基于聚碳酸酯吸收和径迹刻蚀计数的氡-222 测量技术建模”, 《保健物理》第 97 期 (2009 年) 第 604—612 页。
- [II-39] DOI, M., KOBAYASHI, S., FUJIMOTO, K., “日本因室内氡和钍浓度升高导致高风险房屋表征的非能动测量技术”, 《辐射防护剂量学》第 45 期 (1992 年) 第 425—430 页。
- [II-40] TOKONOMI, S., TAKAHASHI, H., KOBAYASHI, Y., ZHOU, W., HULBER, E., “用于大规模测量的最新氡-钍离子鉴别探测器”, 《科学仪器仪表评论》第 76 期 (2005 年) 第 113505—113509 页。
- [II-41] FALK, R., MORE, H., NYBLOM, L., “通过闪烁室在空气中测量氡-220 并对记录的脉冲事件进行多次分析”, 《辐射防护剂量学》第 45 期 (1992 年) 第 111—113 页。
- [II-42] HIMOTO, T., KUROSAWA, R., “带三次门的氡-220 脉冲符合监视器”, 《国际环境》第 22 期增刊 1 (1996 年) 第 S1139—S1145 页。
- [II-43] McLAUGHLIN, J., “室内环境中钍及其后代的研究概况”, 《辐射防护剂量学》第 141 期 (2010 年) 第 316—321 页。
- [II-44] HARIDASAN, P.P., PILLAI, P.M.B., TRIPATHI, R.M., PURANIK, V.D., “稀土化合物生产装置中职业性辐射照射”, 《辐射防护剂量学》第 131 期 (2008 年) 第 217—221 页。
- [II-45] KOTRAPPA, P. 等, “改进的双滤光片法测量环境和呼吸中氡/钍射气”, 《辐射防护监控进展》(研讨会论文集, 斯德哥尔摩, 1978 年), 国际原子能机构, 维也纳 (1979 年) 第 423 页。

- [II-46] ZHOU, W., IIDA, T., “用沉积速率测量法估算住宅中钍子代浓度”, 《日本物理保健杂志》第 35 期 (2000 年) 第 365—370 页。
- [II-47] MISHRA, R., MAYYA, Y.S., “基于沉积的直接钍子传感器 (DTPS) 技术在室内环境中估算平衡等效钍浓度 (EETC) 的研究”, 《辐射测量》第 43 期 (2008 年) 第 1408—1416 页。
- [II-48] 美国试验和材料学会《通过过滤器上的活性取样测定室内空气中氡衰变产物浓度和工作水平的标准试验法》(ASTM D6327-10), 宾夕法尼亚州西康舍霍肯市 (2010 年)。
- [II-49] FROŇKA, A., MOUČKA, L., ČECHÁK, T., “室内建筑环境中先进氡诊断方法的应用”, 《辐射防护剂量学》第 130 期 (2008 年) 第 172—175 页。
- [II-50] FROŇKA, A., “室内和土壤气体氡同步测量以详细分析氡进入房屋的途径”, 《辐射防护剂量学》第 145 期 (2011 年) 第 117—122 页。

附件 III

采取降低新住宅和其他新建建筑中 氡-222 浓度预防措施

III-1. 越来越多的国家在新建建筑中采取防止氡-222 累积的措施。在新楼建造时对氡采取预防措施通常比对现有住宅采取纠正措施更便宜、更容易。在新建筑物采取氡预防措施将逐步降低存量住房中氡-222 的平均浓度，从而有助于减少室内氡-222 对公众健康的长期影响。此外，这些措施还可以改善室内空气质量的其他方面。这儿针对世界四季分明气候的区域制定了氡的预防措施，其他地区使用这些措施时应该进行检查确保适用性。

III-2. 在住宅的整个楼底安装一层永久的防渗膜，将建筑物与地面隔离开，是一种有效的新建筑物防氡措施。防氡膜的有效性很大程度上取决于安装时的谨慎程度。如有可能，最好在新建建筑物时将防氡膜检查作为常规视察的一部分。防氡膜的完整性和耐久性通常比其对氡扩散的阻隔作用更重要。氡的扩散系数是从市场上购买防水材料中选择有氡防护效果的合适参数 [III-1]。常用防水材料中的氡扩散系数值见文献 [III-2]。氡扩散系数的测量也可用于预制膜接缝气密性的试验。

III-3. 除防渗膜外，还可通过土壤（底板）通风或降压，或底板空隙通风和/或降压来预防。这些系统的作用是稀释隔膜下的氡浓度，并与室内压力相比降低土壤或地板空隙内的空气压力。系统可以采用非能动或能动或两种方式同时的方式。对排风扇的安装设置取决于土壤的渗透性、地基的几何形状、地面空隙高度和通风方式（即有或没有竖直接气管）。非能动方式可通过安装抽风机 [III-3] 来变为能动式。在人们居住的建筑中测量氡的浓度显示非能动通风方式无效时可以通过该方式改进。关于氡-222 预防措施的详细实用建议可见一些国家主管部门的出版物 [III-4—III-11]。

III-4. 新建筑中氡-222 的预防措施一般通过国家建筑规范来实施。这类规范的例子见表 III-1，该表基于参考文献 [III-12]。针对氡-222 的预防措施的一个特别重要特点是，通常它们能有效降低其他污染物的浓度，否则这些污染物会带着土壤中的氡进入住宅。这是一个重要的好处，但可能很难用正式的方式量化。

III-5. 在一些国家，在施工前测量土壤中氡-222 的浓度并评价建筑工地土壤的析出率，以便就氡-222 的预防措施纳入待建住宅的程度提供指导 [III-13]。根据特定情况，这些措施有助于提高氡-222 预防措施的设计效率。在建造节能住宅中使用的建筑方法可能对室内氡-222 的浓度产生有利或不利的影 响。与现有建筑物相比，符合国家标准新建筑物的气密性往往导致较 低的空气交换率。通过提高建筑物中的热效率，室内空气的较高温度可 导致建筑物内的压力降低，从而可导致从土壤氡-222 进入建筑物的量增加。一些国家修订了相关建筑法规，以确保在节能建筑中避免室内高浓度的 氡-222。

表 III-1. 各国家关于新建建筑物中氡-222 的预防措施的法律

(基于 Lund [III-12] 的工作，已更新)

| 国家 | 监管部门或机构 | 法规、法律、规则 | 日期 |
|-------|--------------------------|-------------------------------------|--------|
| 加拿大 | 加拿大建筑与消费法规委员会 | 《加拿大 1995 年国家建筑规则》(1998 年修订) | 1998 年 |
| 捷克共和国 | 国家核安全办公室 | 《第 18/1997 号原子法》及修订版 | 1997 年 |
| | | 《第 307/2002 号条例》及修订版 | 2002 年 |
| | 捷克标准，计量与试验办公室 | 《捷克建筑标准》CSN 730601 | 2006 年 |
| 丹麦 | 住房署 | 《小型建筑监管》 | 1998 年 |
| 芬兰 | 建筑信息有限公司与环境部共同制定 | 《建筑信息 RT — 新建建筑物中氡的防护》(RF-81-10791) | 2003 年 |
| | 环境署 | 《建筑规则 B3 地基和 D2 — 建筑物中室内气象和通风》 | 2003 年 |
| 德国 | 萨克森州内政部 | 《撒克逊建筑条例》 | 1997 年 |
| | 联邦环境、自然保护与核安全部、德国联邦土地环境部 | 《辐射防护条例》 | 2001 年 |

表 III-1. 各国家关于新建建筑物中氡-222 的预防措施的法律 (续)

(基于 Lund [III-12] 的工作, 已更新)

| 国家 | 监管部门或机构 | 法规、法律、规则 | 日期 |
|-------|---------------|---------------------------------------|----------|
| 爱尔兰 | 环境部 | 国家建筑条例及相关技术指导文件 | 1997 年 |
| | NSAI/爱尔兰协议委员会 | 《氡防护膜评定与认证协议》(SI 第 497 号) | 1997 年 |
| 波兰 | 波兰原子能机构 | 不再有效 | 至 2002 年 |
| 斯洛文尼亚 | 环境与规划部 | 《建筑空调与通风规则》(Off. Gazette No. 42/2002) | 2002 年 |
| 瑞典 | 国家建筑规划与建造委员会 | 《建筑条例》(BFS2014:3 BBR 21) | 2014 年 |
| | | 《规划与建造法》 | 1987 年 |
| 瑞士 | 瑞士联邦公共卫生局 | 《辐射防护法》(SR 814.50) | 1991 年 |
| | | 《辐射防护条例》(SR 814.501) | 1994 年 |
| 英国 | 瑞士建筑师与工程师协会 | 《建筑隔热和防潮标准》SIA 180 标准 | 1999 年 |
| | 副总理办公室, 建筑法规部 | 《英格兰和威尔士建筑条例》 | 1999 年 |
| | 北爱尔兰环境部 | 《北爱尔兰建筑条例》 | 2001 年 |
| | 苏格兰行政主管部门 | 《苏格兰建筑条例》 | 1999 年 |

附件 III 参考文献

- [III-1] JIRÁNEK, M., ROVENSKA, K., “制定测定防水材料中氡扩散系数的通用标准化方法的基本原则”, 《辐射和同位素应用》第 70 期 (2012 年) 第 752—757 页。
- [III-2] JIRÁNEK, M., KOTRBATÁ, M., “360 种不同化学成分防水材料的氡扩散系数”, 《辐射防护剂量学》第 145 1 期 (2012 年) 第 178—183 页。

- [III-3] ARVELA, H., HOLMGREN, O., REISBACKA, H., “芬兰新建筑中的氡预防：2009 年全国抽样调查”，《辐射防护剂量学》第 148 4 期（2012 年）第 465—474 页。
- [III-4] 英国建筑研究所《氡：新建筑保护措施导则》，第 BR211 号报告，英国建筑研究所，加斯頓（2007 年）。
- [III-5] 德国环境部、德国联邦辐射防护办公室，《德国氡手册》，德国环境部，波恩（2001 年）。
- [III-6] 美国环境保护署《建造抗氡房屋：如何建造抗氡房屋的分步导则》（2001 年版），<http://www.epa.gov/radon/pdfs/buildradonout.pdf>
- [III-7] 环境和地方政府部门《现有建筑物中的氡：纠正选项》，都柏林（2002 年），<http://www.environ.ie/en/DevelopmentHousing/BuildingStandards/PublicationsDocuments/FileDownload,1656,En.pdf>
- [III-8] 英国建筑研究所《如何降低你家中的氡水平》，英国建筑研究所，加斯頓，沃特福德（2000 年），<http://www.bre.co.uk/radon/reduce.html>
- [III-9] 捷克标准办公室《防止建筑物受到土壤中氡的影响》（CSN730601），捷克标准、计量和试验办公室（2006 年）。
- [III-10] 瑞士联邦公共卫生局《关于新时代的建议（2012 年）》，
http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.?lang=en&download=NHZLpZeg7t_Lnp6I0NTU042I2Z6ln1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCEfX5_f2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--
- [III-11] 奥地利卫生和营养局、环境、自然保护和运输部，巴伐利亚州环境局，拜耳国家环境局、瑞士联邦或公共卫生局、海外监管办公室，《氡：新建建筑物注意事项》（2011 年），
http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.html?lang=en&download=NHZLpZeg7t_Lnp6I0NTU042I2Z6ln1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCfH18g2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--
- [III-12] Lund, C.E., “保护新建筑 — ERRICCA 项目的 D7 号可交付成果”，欧洲委员会，卢森堡（2004 年）。
- [III-13] NEZNAL, M., NEZNAL, M., MAOTLIN, M., BARNET, I., MIKSOVA, J., “评定建筑工地氡风险的新方法”，《捷克地质调查特别报告第 16 篇》，捷克地质调查局，布拉格（2004 年）。

附件 IV

采取减少现有住宅和其他建筑物中 氡-222 浓度的纠正措施

氡-222 浓度降低的纠正措施

IV-1. 已证明通过采取纠正措施降低现有住宅的高浓度氡-222 是可行的。纠正措施旨在防止氡-222 从土壤进入建筑物,或通过改善室内通风将氡-222 从建筑物中排出。任何纠正措施的有效性取决于住宅的建造、气候以及居住者的生活方式。这儿针对世界四季分明气候的区域制定了氡的预防措施,其他地区使用这些措施时应该进行检查确保适用性

IV-2. 纠正措施方法有能动式的或非能动式的。非能动方法纠正措施不需要任何形式的机械辅助,而能动纠正措施则依靠机械辅助来实现最佳性能。非能动纠正措施的例子包括使用阻隔氡-222 渗透的屏障、墙壁通风口和窗户通风口。能动纠正措施的例子包括使用风扇辅助的地下减压、风扇辅助的地板下通风和建筑物的室内机械通风。能动措施的主要缺点是需要一定的费用以及正常运行的定期检查和长期维护。非能动措施通常比能动措施成本低,但不如能动措施有效,而且可能完全失效或部分失效。

IV-3. 此类纠正措施的实际应用和有效性描述如下。这些措施的使用需要以可在其他地方获得的更详细的技术资料为指导[IV-1—IV-4]。一些国家主管部门公布了针对氡-222 的纠正行动建议[IV-5],欧洲公布了对这一事项和其他氡-222 相关事项的重要评审报告[IV-6]。纠正行动可能因国而异,一些国家可能需要考虑到本国的建筑规范制定纠正行动。

IV-4. 在某些情况下,可通过试验以确定最适当的纠正措施[IV-3]。优化的原则必须是以坚持不懈地努力实现氡-222 浓度的降低,而不是使其浓度刚好低于参考水平。参考文献[IV-7]提供了一个纠正措施的成本效益和成本效益分析的示例。

IV-5. 根据纠正措施,需要测量氡-222 的浓度,以验证其是否被充分降低。

IV-6. 少数情况下，室内氡-222 的来源可能是建筑材料，而不是建筑下面的地面[IV-8]。在该情况下，可能需要考虑限制使用某些建筑材料。如果建筑材料是现有建筑物中氡的主要来源，则可通过清除具有高氡析出率的建筑材料来降低室内氡的浓度；通过在氡析出率高的建筑材料周围形成通风的空气间隙；或增加室内通风[IV-9]。由于涂防渗材料对氡-222 的降低有效性很弱，因此应避免在建筑材料表面涂覆防渗涂料。然而，表面涂层也可能有效地减少氡-220 射气（见第 3.67 段）。

IV-7. 改造建筑物提高能效的建筑实践可对室内氡-222 浓度降低产生有利或不利的影[IV-10、IV-II]。提高建筑物的气密性可以减少室内空气和室外空气的混合。通过提高建筑物中的热效率，室内较高温度可导致建筑室内的压力降低，从而可导致从土壤进入建筑物的氡-222 浓度增加。一些国家修订了相关建筑法规，确保改建后的建筑室内不会出现较高浓度氡-222。参考文献[IV-12]给出了一国家主管部门就改装隔热材料的效果建议的例子。

土壤通风与降压

IV-8. 土壤通风与降压系统有以下方式：

- (a) 如果使用新地板替换原有地板时，在新地板下排水层中放置多孔管；
- (b) 在现有地面以下插入不破坏原有地面的多孔管；插入时可以从地下室，也可以从一个房间的管道坑或从外部；
- (c) 一个通过管道与外部相连在地板地下的桶大小的空腔的氡池；氡池可通过挖掘楼板或通过从住宅外部插入地基的管道来建造；
- (d) 在建筑物下面或附近建的氡井。井的深度通常为 3—5 米。氡井具有可渗透的结构，允许空气从相邻的土壤中抽出。

上述土壤通风与降压系统通过地面下的土壤与地面上的土壤之间的压差负反馈来运行。

IV-9. 管道中的小型电风扇通常用于控制负压，使用这种风扇控制的系统称为能动式系统。在不使用风扇的情况下，该装置称为非能动式系统。非能动系统的有效性依赖于温差和风压引起的自然压差。非能动式系统的优点是没有运行成本，绝对安静，通常不需要定期检查或长期维护。然而，非能

动式系统通常不如能动式系统有效。在氡-222 的浓度为几百贝可/立方米或更高的情况下，能动式系统可能是最有效的解决方案。

加强地下通风

IV-10. 对于悬空木的地板或混凝土地板的住宅，增加地板下的空气流量可以减少进入建筑中氡-222 的量。可以通过增加或更换更多的地板下通风口或空心砖或换气口来增加空气换气流量。现在与粘土空心砖相同大小的塑料空心砖有一个比粘土空心砖更大的开放表面。空心砖的位置对氡-222 浓度的降低具有显著影响，因为将空心砖放置在没有空气流的封闭区中将降低其效果。

IV-11. 如果发现非能动方式未能达到降低氡-222 浓度的目的，则安装风扇能加强地板下的通风。风机可以安装在将空气吹入地下空间（送风通风）或从地下空间排出空气（抽气通风）的地方。安装风扇时，须注意可能不利于管道系统的水分的凝结或结霜，会导致风扇的损坏。

正压

IV-12. 氡-222 的纠正措施的正压方法包括在阁楼中安装专门风扇将空气吹入住宅或地下室。该方法降低或甚至逆转了住宅中相对于外部空气的通常负压，从而减少氡-222 的进入。空气可以从阁楼本身或从外面排出。在这两种情况下，较冷的空气在吸入住宅时需要加热。

IV-13. 正压最适合相对密闭的住宅，目前发现在单层住宅中最有效[IV-4]。正压系统安装简单，不需要破坏主体结构，但它们有冷凝作用的巨大缺点。因此，该措施不适用于寒冷气候地区。此外，这种系统的运行成本可能比土壤能动降压系统的运行成本要高。

气隙通风或减压

IV-14. 在与土壤直接接触的建筑物（墙壁和地板）周围产生气隙。通过通风或在这些缝隙中产生轻微的负压，会降低从土壤进入室内的氡迁移。非能动通风或能动通风都是可行的。气隙在不仅可影响氡-222 的进入而且也影响建筑的湿度情况下是非常有效的。

加强室内通风

IV-15. 可以通过打开通风口、增加额外的墙壁通风口或安装窗户微流通风口来加强室内的通风。增加通风量，使富含氡-222 的室内空气与室外空气混合，从而降低室内空气中氡-222 的浓度。安装或打开通风口还可以降低住宅的负压，从而降低氡-222 从地面吸入住宅的趋势。

IV-16. 针对氡-222 的纠正措施增加背景通风，只需在一楼进行。增加上层的通风量会导致氡-222 的浓度升高。因为增加上层的通风可能会产生烟囱效应，从而将空气从住宅中吸出。

IV-17. 在室内外温差最大的地方，氡-222 的浓度往往最高，因此增加通风不可能是有效的解决办法，除非住户在整个冬季保持高通风率[IV-7]。

IV-18. 增加自然通风的优点是完全非能动，因此不需要长期维护。通常这亦有助于改善室内空气质量。

IV-19. 热回收通风系统（具有空气到空气热交换器）是一种动力系统，用于在用抽取的空气加热（或在必要时冷却）进入的的同时增加住宅中的通风。这种系统也助于降低室内空气中氡-222 的浓度。

IV-20. 空调系统会影响氡-222 从地面进入住宅。重要的是要确保保持进气和排气之间的平衡，以确保空调系统不会在住宅中产生负压，但如果可能的话产生轻微的正压。如果空调系统加强住宅的通风量，也将有助于室内氡-222 稀释从而降低氡-222 的浓度。

地板和墙壁的密封

IV-21. 理论上，通过密封所有氡-222 进入点，例如实心地板中的裂缝、与地面接触的墙壁裂缝或开口以及电缆和管道周围的缝隙，可以防止氡-222 从地面进入住宅。然而实践中有效的密封往往极难实现，如果不是单独使用，而是与其他方法一起应用则更能有效降低氡-222。

IV-22. 密封氡-222 从地面进入住宅的所有可能的途径，包括拆除地板覆盖物和踢脚板，然后使用合适的密封胶密封所有裂缝和接缝。密封胶必须足够耐用和灵活，以适应建筑结构的未来调整。

IV-23. 为了使密封方法成功、有效，必须密封所有缝隙。然而，有些缝隙可能不可见，随着时间的推移，也可能会出现新的裂缝和开口。这些没有密封的剩余缝隙会增加氡-222 的进入量，结果可能仅实现了轻微氡-222 浓度的降低。

IV-24. 如果可以用隔膜覆盖悬浮地板下的地面（例如，对于具有爬上空间的住宅），则是降低氡-222 浓度的有效的纠正措施，特别是与使用泵来降低隔膜下的压力（如使用氡池）相结合。把薄膜直接覆盖在木地板上必须格外注意木头腐烂的问题。

附件 IV 参考文献

- [IV-1] ScivyeR, C., “现有住宅氡治理措施的建筑研究所导则：室内氡水平高的住宅测量”；英国建筑研究所，英国建筑研究所第 250 号报告，英国建筑研究所，加斯顿（1993 年）。
- [IV-2] 英国建筑研究所《建筑物和氡：英国建筑研究所良好建筑导则和良好维修导则：所有建筑专业人员的信息库》，英国建筑研究所，加斯顿（2013 年）。
- [IV-3] 美国环境保护署《消费者减少氡导则》（2013 年），
<http://www.epa.gov/radon/pubs/consguid.html>
- [IV-4] Naismith-S.P., Miles-J.C.H., Scivyer-C.R., “房屋特征对氡治理措施有效性的影响”，《保健物理》第 75 期（1998 年）第 410—416 页。
- [IV-5] 奥地利卫生和营养局、环境、自然保护和运输部，巴伐利亚州环境局，拜耳国家环境局、瑞士联邦或公共卫生局、海外监管办公室，《氡：现存建筑物的缓解措施》（2011 年），
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.html?lang=en&download=NHZLpZig7t,Lnp6I0NTU042I2Z6ln1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCJfH19e2ym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s->
- [IV-6] Swedjemark, G.A., “从瑞典角度看氡的历史”，《辐射防护剂量学》第 109 期（2004 年）第 421—426 页。

- [IV-7] Jiranek, RovenskyK, “氦治理措施优化成本效益分析的有限适用性”, 《危害材料杂志》第 182 期 (2010 年) 第 439—446 页。
- [IV-8] 捷克标准办公室, 《防止建筑物受到土壤中氦的影响》(CSN730601), 捷克标准、计量和试验办公室 (2006 年)。
- [IV-9] 捷克标准办公室, 《建筑材料的氦和 γ 辐射防护》(CSN730602), 捷克标准、计量和试验办公室 (2000 年)。
- [IV-10] Jiranek, M., Kacmarikova, V., “热装修建筑中氦浓度升高的处理”, 《辐射防护剂量学》第 160 期 (2014 年) 第 43—47 页。
- [IV-11] FOJTIKOVA, I., NAVRATILOVAROVENSKA, K., “节能措施对捷克共和国部分幼儿园氦浓度的影响”, 《辐射防护剂量学》第 160 期 (2014 年) 第 149—153 页。
- [IV-12] 奥地利卫生和营养局、环境、自然保护和运输部, 巴伐利亚州环境局, 拜耳国家环境局、瑞士联邦或公共卫生局、海外监管办公室, 《氦 — 保温改造的影响》(2011 年),
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.html?lang=en&download=NHZLpZig7t,Lnp6I0NTU042l2Z6ln1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCJfH18gWym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s->

附件 V

关于氡所致风险的公众宣传计划

V-1. 公众对氡的关注通常低于公众对其他类似风险的关注，或对诸如与人工辐射有关的低得多的风险的关注。李（Lee）[V-1]报告说，公众最关注的危害是：

- (a) 人造的超过天然的；
- (b) 人为的超过偶然产生的；
- (c) 对群体伤害超过个人伤害；
- (d) 明显的、直接的和“可怕的”，超过隐蔽的、拖延的和熟悉的。

V-2. 上述四个因素都不会增加人们对氡的关注，一项研究发现，住户往往否认存在健康风险[V-2]。由于这一原因，公众宣传计划对于氡的风险来说是必不可少的。

V-3. 许多国家的主管部门已认识到有必要开展关于氡的公众宣传计划，并已采取措施逐步提高公众对氡风险的认识。无论采取何种特定办法提高公众认识，取得进展都需要若干缔约方的长期努力：国家和地方政府、卫生主管部门、国家和国际辐射保护组织和环境组织、监管机构和公众自身。Scivyer[V-3、V-4]和欧洲委员会氡预防和治理小组的工作介绍了欧洲对提高氡认识的活动，该小组的工作包括风险沟通[V-5]。

V-4. 提高对氡的认识的活动所针对的最重要群体可能是建筑业主，但也应包括地方主管部门工作人员、勘测人员、建筑师、住房相关专业人员、房地产经纪人员、律师、卫生和安全专业人员以及医疗专业人员等其他重要群体。要传达的广泛信息在所有情况下都是一样的，但特定的重点和详细程度以及内容需要适合其特定需要。

V-5. 特别重要的一点是提供针对非专业人员的简单书面材料（可能是网上材料）。例子如下：

- 公民氡指南：保护自己和家人免受氡危害指南[V-6]；
- 房屋买卖双方氡指南[V-7]；

- 氡：加拿大房主指南[V-8]；
- 了解氡的治理：住户指南[V-9]；
- 氡-主要的天然辐射源；住宅中的氡；建筑物中高氡浓度的防止措施[V-10]；
- 德国氡手册[V-11]；
- 氡—不要生活在危害之中[V-12]；
- 安全与氡共存[V-13]；
- 氡的危害：氡是什么，如何预防，如何测量，如何缓解危害 — 关于氡的 13 个问题[V-14]；
- 氡对你健康的危害[V-15]；
- 建筑物中的氡—现有建筑物的治理和新建筑物的预防导则[V-16]；
- 2012—2020 年国家氡行动计划[V-17]；
- 氡：关于“辐射”的知识[V-18]。

V-6. 国家级的“氡活动”有助于提高人们对氡作为一个公共卫生问题的认识。然而，如果在地方级开展测量和纠正行动，则会更加有效[V-19、V-20]。这既是因为市民和官员对本地的情况比较熟悉，也因为市民对本地官员所传达的信息可能更为信任。通过地方活动，可以制作专门针对地方关切问题的传单，并有可能采用廉价和有效方法，如图书馆和公共办公室的展台。开展由了解氡问题的专业人员参加的氡活动，可促进氡的测量和纠正措施，在帮助减少氡造成的风险方面产生重大影响。这些专业人士包括地方主管部门人员、测量师、建筑师、房屋专业人士、地产代理、律师、健康及安全专业人士和医护人员。

V-7. 电子和印刷媒体的参与是氡活动的一个重要部分。国家和地方新闻界的信息必须一致。地方电台也可以发挥重要作用。专门出版物和新闻中针对特定主管部门和专业读者的文章本身就很重，可以支持提高认识活动[V-21、V-22]。

V-8. 理想情况下，还可以面对面地向公众提供相关信息。地方主管部门工作人员工作时间访问住宅，鼓励业主采取纠正措施，事实证明是非常有效的。由地方主管工作人员和国家专家参加的展览或公共晚会也可促进纠正

行动,帮助减少氡造成的危害。热线电话和网站等远程咨询服务也是传播咨询和指导的经济有效手段。

附件 V 参考文献

- [V-1] LEE, T.R., “公众对氡的感知”,《辐射防护剂量学》第 42 期(1992 年)第 257—262 页。
- [V-2] ZHANG, W., ZHOU, Y., MEARA, J., GREEN, M., “英国国内氡计划的评价和公平监查”,《卫生政策》第 102 期(2011 年)第 81—88 页。
- [V-3] Scivyer, S., “欧洲氡认识活动回顾”,英国建筑研究所,加斯顿(2005 年)。
- [V-4] Scivyer, S., “2002—2003 年公众氡认识提升问卷结果汇编”,英国建筑研究所,加斯顿(2005 年)。
- [V-5] 欧洲委员会《氡防治概况及背景(2014 年)》,
<http://web.jrc.ec.europa.eu/radpar/>
- [V-6] 美国环境保护署《公民氡导则:保护自己和家人免受氡污染的导则》(2012 年),<http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html>
- [V-7] 美国环境保护署《买房和卖房氡导则》(2013 年),
<http://www.epa.gov/radon/pubs/hmbyguid.html>
- [V-8] 加拿大住房抵押贷款委员会、加拿大卫生部《氡:加拿大屋主导则》,加拿大住房抵押贷款委员会和卫生部,渥太华(1997 年)。
- [V-9] 爱尔兰辐射防护研究所《了解氡治理:户主导则》,爱尔兰辐射防护研究所,都柏林(1997 年)。
- [V-10] 辐射防护协会《氡自然辐照的主要原因》(2013 版),http://www.bfs.de/de/bfs/publikationen/broschueren/ionisierende_strahlung/radon/
- [V-11] 德国环境部、德国联邦辐射防护办公室,《德国氡手册》,德国环境部,波恩(2001 年)。

- [V-12] 卫生保护机构《不要与氡风险共处》，卫生保护机构，奇尔顿，迪德科特（2005年），
http://www.doeni.gov.uk/nica/radon_at_homeat_work_booklet.pdf
- [V-13] 瑞典辐射安全局《无氡货车》（2009年），
http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Broschyr/2009/Faktablad_Vagen_till_ett_radonfritt_boende2.pdf
- [V-14] 国家专家协会合格专家《氡风险是什么？如何预防，如何测量，如何干预 — 关于氡的13个问题（2003年）》，
http://www.anpeq.it/anpeq/download/libretto_radon.pdf
- [V-15] 英国卫生保护署《氡对你健康的风险（2009年）》，
<http://www.ukradon.org/article.php?key=risksradon>
- [V-16] 建筑物科学技术中心《建筑物中的氡 — 现有建筑物中的治理和预防导则》，建筑物科学技术中心，巴黎（2008年）。
- [V-17] 瑞士联邦公共卫生局《2012—2020年氡的国家行动计划》，伯尔尼（2011年），<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11649/index.html?lang=en>
- [V-18] 瑞士联邦公共卫生局《氡：关于“辐射”的信息（2008年）》，
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/index.html?lang=en>
- [V-19] Poortinga, W., Bronstering, K., Lannon, S.C., “室内氡照射风险的认识和感知：一种评价英格兰和威尔士氡认识和试验运动的基于人群的方法”，《风险年刊》第31期（2011年）第1800—1812页。
- [V-20] KENDALL, G.M., GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., DIXON, D. W., “英国氡规划的进展”，《辐射防护》第25 4期（2005年）第475—492页。
- [V-21] Poortinga, W., Bronstering, K., Lannon, S.C., “室内氡照射风险的认识和感知：一种评价英格兰和威尔士氡认识和试验运动的基于人群的方法”，《风险年刊》第31期（2011年）第1800—1812页。
- [V-22] FOJTIKOVA, I., ROVENSKA, K., “氡规划和健康市场”，《辐射防护剂量学》第145期（2011年）第92—95页。

附件 VI

适用建筑材料的评估算法

建筑材料剂量评定方法

VI-1. 本附件介绍了以马卡宁 (Markkanen) [VI-1]方法为基础的计算建筑材料 γ 外照射剂量的方法。结果以剂量率方式列在表格中。这允许不使用计算机计算的情况下开展最典型的剂量评定。本附件提供了此类评定的五个实例。

VI-2. 该方法是基于计算均匀密度的建筑材料构成的矩形建筑物的剂量率，且建筑材料含有放射性核素的放射性活度浓度为均匀的。如图 VI-1 所示室内剂量率的是房间墙壁、地板和天花板中的各自放射性核素造成的外照射剂量率相加计算得到的。因为门窗剂量的占比影响较小，因而为了简化计算，计算时忽略门窗的影响。计算时考虑不同活度浓度的放射性核素分布在两层不同密度的建筑材料中；例如，一种如瓷砖的薄层材料覆盖在混凝土墙上的情况。

VI-3. 在许多情况下，建筑材料本身能够有效地屏蔽地面土壤本底 γ 辐射。在大型混凝土结构情况下，几乎完全屏蔽土壤本底 γ 辐射。建筑材料的 1 毫希沃特/年参考水平的定义为：由于这些建筑材料造成照射量高于正常本底辐射水平时引起的“附加照射”。确定“附加照射”的基本方法如下：

- (a) 首先，在考虑建筑材料对本底中的 γ 辐射的屏蔽后，计算由建筑材料和本底引起的总照射剂量；
- (b) 去除本底照射剂量；
- (c) 结果与参考水平进行比较的确定“附加照射”。

VI-4. 在以下计算示例中，假定地球上本底 γ 辐射的世界人口加权平均剂量率为 60 纳戈瑞/小时[VI-2]。在各国进行计算时，应使用地球本底适用的 γ 辐射水平。建筑材料对宇宙射线的屏蔽作用通常认为是很小的，因此在评价中不考虑宇宙射线辐射照射。

VI-5. 如图 VI-1 所示的标准大小的房间的 γ 剂量率是以在中心计算的。表 VI-1 列出了墙、地板和天花板各自所产生的特定 γ 剂量率，计算室内总剂量率的方法是将墙壁、地板和天花板各自计算的剂量率相加。例 1—5 中描述介绍了使用表 VI-1 中给出的特定剂量率开展各种剂量评定。示例提供了大体积混凝土结构（如公寓楼）和较小、较简单的结构（如发展中国家农村广泛使用的结构）有关的剂量评定实例。

VI-6. 将空气吸收剂量转换为有效剂量的转换系数为 0.7 希沃特/戈瑞 [VI-3]。

VI-7. Risica 等人对房间参数变化对房间内剂量的影响进行了灵敏度分析，得出以下结果 [VI-4]：

- (a) 房间中距墙壁超过 1 米的距离位置的空气吸收剂量率随位置的变化的限制在大约 10%；
- (b) 房子高度固定为 2.8 米，房间的宽度和长度从 2 米—10 米不等，包括矩形和正方形两种形状，以房间尺寸相关函数计算空气吸收剂量率，对于 60 立方米的房间而言，计算结果显示剂量率的最大变化为 6%；
- (c) 以室内墙体、地板和天花板厚度相关的函数计算了室内空气吸收剂量率。计算结果表明，当厚度达到 0.4 米时，厚度的增加会使辐射剂量率增加，而当厚度大于 0.4 米时，材料中的自吸收会使厚度进一步增加的影响忽略不计。

因此，可以得出结论，对于高度固定为 2.8 米的房间，房间尺寸在 12 平方米—100 平方米范围内，计算模式的房间剂量率没有明显变化，或者墙壁厚度的变化没有明显影响。

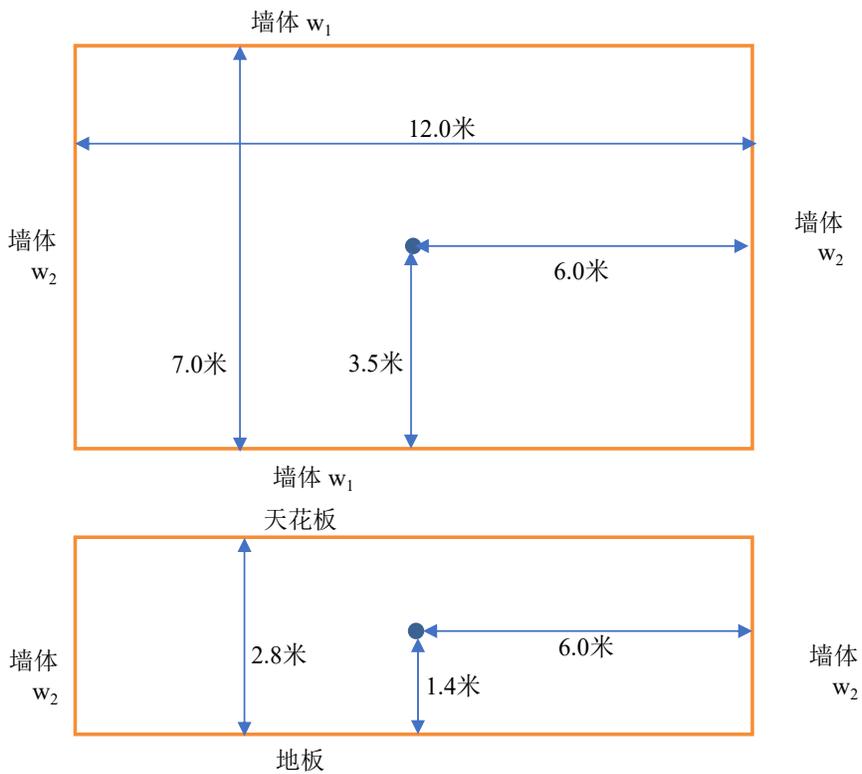


图 VI-1. 计算建筑材料¹导致的室内 γ 剂量率的几何参数。

¹ 剂量率是按房间的中心点计算的。可以看出，由于 4π 照射几何结构，室内其他点的剂量率与中心点的剂量率相差不超过 5—10%。因此，中心点的剂量率是整个房间剂量率的良好近似值。

表 VI-1. 图 VI-1 所示不同结构房间的空气 γ 剂量率

| 墙体、天花板、 地板材料 ^a 单 位面积质量 (公斤/平方米) | 墙体、天花板或地板材料 ^b (顶层) (皮戈瑞/小时) / (贝可/公斤) | | | 墙体、天花板或地板后 0.2 米 砖墙材料 ^c (皮戈瑞/小时) / (贝可/公斤) | | |
|---|--|-------|------|---|-------|------|
| | 镭-226 | 钍-232 | 钾-40 | 镭-226 | 钍-232 | 钾-40 |
| 长度方向墙体尺寸: 12.0 米 × 2.8 米, 距离 3.5 米 | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 95 | 110 | 8.0 |
| 25 | 9 | 10 | 0.73 | 87 | 100 | 7.3 |
| 50 | 18 | 21 | 1.5 | 80 | 94 | 6.7 |
| 100 | 35 | 40 | 2.8 | 65 | 77 | 5.6 |
| 150 | 50 | 56 | 3.9 | 52 | 62 | 4.6 |
| 200 | 61 | 70 | 4.9 | 40 | 50 | 3.8 |
| 300 | 79 | 91 | 6.4 | 24 | 31 | 2.5 |
| 500 | 96 | 110 | 8.1 | 8 | 12 | 1.0 |
| 宽度方向墙体尺寸: 7.0 米 × 2.8 米, 距离 6.0 米 | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 32 | 37 | 2.7 |
| 25 | 2.7 | 3.1 | 0.22 | 30 | 35 | 2.5 |
| 50 | 5.5 | 6.2 | 0.44 | 28 | 32 | 2.3 |
| 100 | 11 | 12 | 0.85 | 22 | 27 | 2.0 |
| 150 | 15 | 18 | 1.2 | 19 | 23 | 1.7 |
| 200 | 20 | 22 | 1.6 | 16 | 19 | 1.4 |
| 300 | 26 | 30 | 2.1 | 10 | 13 | 1.0 |
| 500 | 33 | 38 | 2.7 | 3.7 | 5.4 | 0.4 |
| 地板或天花板尺寸: 12.0 米 × 7.0 米, 距离 1.4 米 | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 350 | 420 | 30 |
| 25 | 46 | 52 | 3.7 | 310 | 370 | 27 |
| 50 | 90 | 100 | 7.1 | 270 | 330 | 24 |
| 100 | 160 | 190 | 13 | 200 | 250 | 18 |
| 150 | 220 | 250 | 18 | 150 | 180 | 14 |
| 200 | 260 | 300 | 21 | 110 | 140 | 11 |
| 300 | 310 | 360 | 26 | 56 | 78 | 6.3 |
| 500 | 350 | 420 | 30 | 15 | 27 | 2.2 |

- a 墙壁、地板或天花板单位面积质量为厚度与密度的乘积。例如，密度为 2000 公斤/立方米的砌块建成 0.15 米厚的墙体，墙体的单位面积质量为 0.15 米×2000 公斤/立方米=300 公斤/平方米。
- b 单位面积一定质量的墙壁、 w_1 或 w_2 或地板或天花板引起的剂量率。例如，如果墙壁 w_1 单位面积质量为 300 公斤/立方米并且其镭-226 的活度浓度为 100 贝可/公斤，则墙壁 w_1 中的镭-226 引起的剂量率为 79 (皮戈瑞/小时) / (贝可/公斤) × 100 贝可/公斤 = 7900 皮戈瑞/小时 = 7.9 纳戈瑞/小时 = 0.0079 微戈瑞/小时。括号中的“首层”是由两个不同的材料层构成墙体、天花板或地板结构的情况；例如，首层为瓷砖，后面为混凝土结构。在这种情况下，本栏中给出的特定剂量率可用于“首层”材料，如瓷砖。
- c 在双层结构的情况下（见脚注 b），此栏给出首层后面 20 厘米厚的混凝土结构的剂量率。考虑首层的屏蔽效应，因此，随着首层单位面积质量的增加，则第二层材料的造成的剂量率变小。

剂量评定示例

例 1：在镭-226 和钍-232 浓度略高于平均值的混凝土室内 γ 辐射照射

VI-8. 房间的墙壁、地板和天花板是用混凝土建造的，如图 VI-1 所示。假定混凝土中天然放射性核素含量略高于天然水平，假定房间的规格如表 VI-2 所示。

表 VI-2. 例 1：如图 VI-1 所示房间的参数

| 核素 | 地板、天花板、墙体（混凝土） |
|-------|----------------|
| | 活度浓度 |
| 镭-226 | 80 贝可/公斤 |
| 钍-232 | 80 贝可/公斤 |
| 钾-40 | 800 贝可/公斤 |
| 其他参数 | |
| 混凝土密度 | 2350 公斤/立方米 |
| 混凝土厚度 | 0.20 米 |

VI-9. 墙体、地板和天花板单位面积质量为 2350 公斤/立方米×0.20 米=470 公斤/平方米，因而使用表 VI-1 中 500 公斤/平方米单位面积质量的剂量率。室内剂量率计算如表 VI-3 所示。

表 VI-3. 例 1：如图 VI-1 所示室内剂量率

| 源 | 计算 | 剂量率 |
|---------------------------|----------------------------|---------------|
| w ₁ (混凝土) | 2×(96×80+110×80+8.1×800) | 0.0459 微戈瑞/小时 |
| w ₂ (混凝土) | 2×(33×80+38×80+2.7×800) | 0.0157 微戈瑞/小时 |
| 地板和天花板 (混凝土) | 2×(350×80+420×80+30×800) | 0.1712 微戈瑞/小时 |
| 室内总剂量率 (不包括宇宙辐射) | | 0.2328 微戈瑞/小时 |
| 室外地面 γ 辐射：建筑物的混凝土结构屏蔽这种辐射 | | -0.06 微戈瑞/小时 |
| 建筑材料引起的过量剂量率 | | 0.1728 微戈瑞/小时 |
| 过量有效剂量 | 0.7 希沃特/戈瑞 × 0.1728 微戈瑞/小时 | 0.121 微希沃特/小时 |

VI-10. 年附加的有效剂量取决于年居留时间：

100%居留因子：8760 小时/年×0.121 微希沃特/小时 = 1060 微希沃特/年 = 1.1 毫希沃特/年

80%居留因子：7008 小时/年×0.121 微希沃特/小时 = 848 微希沃特/年 = 0.85 毫希沃特/年

60%居留因子：5256 小时/年×0.121 微希沃特/小时 = 636 微希沃特/年 = 0.64 毫希沃特/年

例 2：由高浓度的镭-226 和钍-232 的材料建造的墙体且由典型的混凝土建造的地板和天花板的房间中的 γ 辐射照射

VI-11. 图 VI-1 中房间的地板和天花板是由土壤的世界人口加权平均浓度的镭、钍和钾的混凝土建造的，其中镭-226、钍-232 和钾-40 浓度分别为 33 贝可/公斤、45 贝可/公斤和 420 贝可/公斤[VI-2]。墙壁由天然放射性核素含量很高的砖砌成，材料规格如表 VI-4 所示。

表 VI-4. 例 2: 如图 VI-1 所示房间参数

| 核素 | 地板、天花板 (混凝土) | 墙体 (砖) |
|-------|-----------------|-------------|
| | 活度浓度 | 活度浓度 |
| 镭-226 | 33 贝可/公斤 | 200 贝可/公斤 |
| 钍-232 | 45 贝可/公斤 | 300 贝可/公斤 |
| 钾-40 | 420 贝可/公斤 | 1500 贝可/公斤 |
| 其他参数 | | |
| 混凝土密度 | 2350 公斤/立方米 | 2000 公斤/立方米 |
| 混凝土厚度 | 0.20 米 | 0.15 米 |

VI-12. 墙体单位面积质量为 2000 公斤/立方米 \times 0.15 米=300 公斤/平方米, 地板和天花板单位面积质量为 2350 公斤/立方米 \times 0.20 米=470 公斤/平方米, 因此使用表 VI-1 中单位面积质量为 300 公斤/平方米墙体和单位面积质量为 500 公斤/平方米地板和天花板的剂量率。室内剂量率计算如表 VI-5 所示。

表 VI-5. 例 2: 如图 VI-1 所示室内的剂量率

| 源 | 算式 | 剂量率 |
|----------------------------|--|---------------|
| w ₁ (砖) | 2 \times (79 \times 200+91 \times 300+6.4 \times 1500) | 0.1054 微戈瑞/小时 |
| w ₂ (砖) | 2 \times (26 \times 200+38 \times 80+2.7 \times 800) | 0.0347 微戈瑞/小时 |
| 地板与天花板 (混凝土) | 2 \times (350 \times 33+420 \times 45+30 \times 420) | 0.0861 微戈瑞/小时 |
| 室内总剂量率 (宇宙射线除外) | | 0.2262 微戈瑞/小时 |
| 混凝土结构对室外陆地上 γ 辐射的减弱 | | -0.06 微戈瑞/小时 |
| 建筑材料附加的剂量率 | | 0.1662 微戈瑞/小时 |
| 附加的有效剂量 | 0.7 希沃特/戈瑞 \times 0.1662 微戈瑞/小时 | 0.116 微希沃特/小时 |

VI-13. 年附加的有效剂量取决于年居留时间:

100%居留因子: $8760 \text{ 小时/年} \times 0.116 \text{ 微希沃特/小时} = 1016 \text{ 微希沃特/年} = 1.0 \text{ 毫希沃特/年}$

80%居留因子: $7008 \text{ 小时/年} \times 0.116 \text{ 微希沃特/小时} = 813 \text{ 微希沃特/年} = 0.81 \text{ 毫希沃特/年}$

60%居留因子: $5256 \text{ 小时/年} \times 0.116 \text{ 微希沃特/小时} = 610 \text{ 微希沃特/年} = 0.61 \text{ 毫希沃特/年}$

例 3: 墙面贴瓷砖的混凝土房间中 γ 辐射照射

VI-14. 图 VI-1 中房间的墙壁、地板和天花板用混凝土建造, 所有墙壁上都贴有天然放射性核素水平较高的瓷砖。材料规格参数如表 VI-6 所示。

表 VI-6. 例 3: 如图 VI-1 所示房间规格参数

| 核素 | 地板、天花板、墙体 (混凝土) | 墙体 (贴有瓷砖) |
|-------|--------------------|--------------|
| | 活度浓度 | 活度浓度 |
| 镭-226 | 33 贝可/公斤 | 1200 贝可/公斤 |
| 钍-232 | 45 贝可/公斤 | 1500 贝可/公斤 |
| 钾-40 | 420 贝可/公斤 | 1200 贝可/公斤 |
| 其他参数 | | |
| 混凝土密度 | 2350 公斤/立方米 | 2500 公斤/立方米 |
| 混凝土厚度 | 0.20 米 | 0.01 米 |

VI-15. 瓷砖的单位面积质量为 $2500 \text{ 公斤/立方米} \times 0.01 \text{ 米} = 25 \text{ 公斤/平方米}$, 因此使用表 VI-I 中剂量率相应值, 计算结果如表 VI-7 所示。

表 VI-7. 例 3: 如图 VI-1 所示室内剂量率

| 源 | 算式 | 剂量率 |
|--------------------------|---------------------------------|----------------|
| w ₁ (瓷砖) | 2×(9×1200+10×1500+0.73×1200) | 0.0534 戈瑞/小时 |
| w ₁ (瓷砖后混凝土墙) | 2×(87×33+100×45+7.3×420) | 0.0209 戈瑞/小时 |
| w ₁ (瓷砖) | 2×(2.7×1200+3.1×1500+0.22×1200) | 0.0163 戈瑞/小时 |
| w ₁ (瓷砖后混凝土墙) | 2×(30×33+35×45+2.5×420) | 0.0072 微戈瑞/小时 |
| 地板与天花板(混凝土) | 2×(350×33+420×45+30×420) | 0.0861 微戈瑞/小时 |
| 室内总剂量率(宇宙射线除外) | | 0.1839 微戈瑞/小时 |
| 混凝土结构对室外陆地上 γ 辐射的减弱 | | -0.06 微戈瑞/小时 |
| 建筑材料附加的剂量率 | | 0.1239 微戈瑞/小时 |
| 附加的有效剂量 | 0.7 希沃特/戈瑞 × 0.1239 微戈瑞/小时 | 0.0867 微希沃特/小时 |

VI-16. 年附加的有效剂量取决于年居留时间:

100%居留因子: 8760 小时/年 × 0.0867 微希沃特/小时 = 760 微希沃特/年 = 0.76 毫希沃特/年

80%居留因子: 7008 小时/年 × 0.0867 微希沃特/小时 = 608 微希沃特/年 = 0.61 毫希沃特/年

60%居留因子: 5256 小时/年 × 0.0867 微希沃特/小时 = 456 微希沃特/年 = 0.46 毫希沃特/年

在本例中, 进一步分析 γ 辐射剂量的来源, 特别是瓷砖引起剂量的量增加是很有意思的。瓷砖的剂量率为 0.0534 微戈瑞/小时 + 0.0163 微戈瑞/小时 = 0.0697 微戈瑞/小时; 然而, 瓷砖造成的剂量率的增加小于 0.0697 微戈瑞/小时, 因为瓷砖降低了其后面混凝土的 γ 辐射造成的剂量率。因此, 通过计算没有瓷砖室内的剂量率, 并通过从上面有瓷砖室内计算的总剂量率减去该剂量率, 可以计算得到瓷砖引起的剂量率的增加量。没有瓷砖室内的剂量率如实例 1 中情况计算, 室内剂量率 0.117 微戈瑞/小时。然后, 瓷砖导致的剂量率的增加为 0.1839 微戈瑞/小时 - 0.117 微戈瑞/小时 = 0.0669 微戈瑞/小时, 对于住户而言, 瓷砖导致的有效剂量率增加为 0.7 微戈瑞/小

时×0.0669 微戈瑞/小时=0.0468 微戈瑞/小时。瓷砖对居住者的年有效剂量增加量取决于年居留时间：

100%居留因子：8760 小时/年 × 0.0468 微希沃特/小时 = 410 微希沃特/年 = 0.41 毫希沃特/年

80%居留因子：7008 小时/年 × 0.0468 微希沃特/小时 = 328 微希沃特/年 = 0.33 毫希沃特/年

60%居留因子：5256 小时/年 × 0.0468 微希沃特/小时 = 256 微希沃特/年 = 0.26 毫希沃特/年

例 4：含高浓度镭-226 轻质材料墙壁建造的房间的 γ 辐射照射

VI-17. 本模式评审了发展中国家农村地区常见的一种建筑形式。图 VI-1 中房间的地板和天花板是由木材、茅草或类似材料制成，因此其对室内 γ 辐射照射的剂量没有贡献。墙体采用镭-226 浓度较高的空心轻质砌块，室内 γ 辐射剂量来源于室内的土壤和墙壁。材料规格参数如表 VI-8 所示。

表 VI-8. 例 4：图 VI-1 所示房间规格参数

| 核素 | 墙体 (构件) |
|-------|-------------|
| | 活度浓度 |
| 镭-226 | 1200 贝可/公斤 |
| 钍-232 | 45 贝可/公斤 |
| 钾-40 | 420 贝可/公斤 |
| 其他参数 | |
| 混凝土密度 | 1000 公斤/立方米 |
| 混凝土厚度 | 0.15 米 |

VI-18. 墙体单位面积质量为 1000 公斤/立方米×0.15 米=150 公斤/米。对于天花板和地板没有剂量贡献。墙体对地面本底辐射没有提供太多的屏蔽作用，因此不扣除本底。室内剂量率计算如表 VI-9 所示。

表 VI-9. 例 4: 图 VI-1 所示室内剂量率

| 源 | 算式 | 剂量率 |
|--|-------------------------------------|----------------|
| w ₁ (构件) | 2× (50×1200+56×45+3.9×420) | 0.1283 戈瑞/小时 |
| w ₂ (构件) | 2× (15×1200+18×45+1.2×420) | 0.0386 戈瑞/小时 |
| 室内总剂量率 (宇宙射线除外) | | 0.1669 微戈瑞/小时 |
| 室外地面 γ 辐射: 因为没有地板, 建筑物材料对该辐射的屏蔽作用很小; 为了简单起见, 假定屏蔽使剂量率减少为零。 | | |
| 建筑材料附加的剂量率 | | 0.1669 微戈瑞/小时 |
| 附加的有效剂量 | 0.7 希沃特/戈瑞×0.1669 微戈瑞/小时 时微戈瑞/小时 | 0.1168 微希沃特/小时 |

VI-19. 年附加的有效剂量取决于年居留时间:

100%居留因子: $8760 \text{ 小时/年} \times 0.117 \text{ 微希沃特/小时} = 1025 \text{ 微希沃特/年} = 1.0 \text{ 毫希沃特/年}$

80%居留因子: $7008 \text{ 小时/年} \times 0.117 \text{ 微希沃特/小时} = 820 \text{ 微希沃特/年} = 0.82 \text{ 毫希沃特/年}$

60%居留因子: $5256 \text{ 小时/年} \times 0.117 \text{ 微希沃特/小时} = 615 \text{ 微希沃特/年} = 0.62 \text{ 毫希沃特/年}$

例 5: 高浓度镭-226 混凝土材料墙建造的室内 γ 辐射照射

VI-20. 本例子与例 4 相同, 不同之处在于本例的墙壁是 20 厘米混凝土。材料规格如表 VI-10 所示。

表 VI-10. 例 5: 如图 VI-1 所示房间规格规格参数

| 核素 | 墙体 (混凝土) |
|-------|-------------|
| | 活度浓度 |
| 镭-226 | 1200 贝可/公斤 |
| 钍-232 | 45 贝可/公斤 |
| 钾-40 | 420 贝可/公斤 |
| 其他参数 | |
| 混凝土密度 | 2350 公斤/立方米 |
| 混凝土厚度 | 0.20 米 |

VI-21. 墙单位面积质量为 2350 公斤/立方米×0.2 米=470 公斤/米, 因此使用表 VI-1 中 500 公斤/平方米单位面积质量的剂量率。室内剂量率计算如表 VI-11 所示。

表 VI-11. 例 5: 如图 VI-1 所示室内剂量率

| 源 | 算式 | 剂量率 |
|--|----------------------------|--------------|
| w ₁ (构件) | 2×(96×1200+110×45+8.1×420) | 0.2471 戈瑞/小时 |
| w ₂ (构件) | 2×(33×1200+38×45+2.7×420) | 0.0849 戈瑞/小时 |
| 室内总剂量率 (宇宙射线除外) | | 0.332 微戈瑞/小时 |
| 室外地面 γ 辐射: 因为没有地板, 建筑物材料对该辐射的屏蔽作用很小; 为了简单起见, 假定屏蔽使剂量率减少为零。 | | 0.00 微戈瑞/小时 |
| 建筑材料附加的剂量率 | | 0.332 微戈瑞/小时 |
| 附加的有效剂量 | 0.7 希沃特/戈瑞×0.332 微戈瑞/小时 | 0.232 戈瑞/小时 |

VI-22. 年附加的有效剂量取决于年居留时间:

100%居留因子: $8760 \text{ 小时/年} \times 0.232 \text{ 微希沃特/小时} = 2032 \text{ 微希沃特/年} = 2.0 \text{ 毫希沃特/年}$

80%居留因子: $7008 \text{ 小时/年} \times 0.232 \text{ 微希沃特/小时} = 1626 \text{ 微希沃特/年} = 1.6 \text{ 毫希沃特/年}$

60%居留因子: $5256 \text{ 小时/年} \times 0.232 \text{ 微希沃特/小时} = 1219 \text{ 微希沃特/年} = 1.2 \text{ 毫希沃特/年}$

附件 VI 参考文献

- [VI-1] Markkanen, M., “具有高天然放射性物质的辐射剂量评定”, 出版号 STUK-B-STO 32, 芬兰辐射与核安全中心, 赫尔辛基 (1995 年)。
- [VI-2] 联合国《电离辐射的来源和影响》(向大会报告), 附件 B: 自然辐射源的照射, 原子辐射效应科学委员会, 联合国, 纽约 (2000 年)。
- [VI-3] 联合国《电离辐射的来源和影响》(向大会报告), 原子辐射效应科学委员会, 联合国, 纽约 (1993 年)。
- [VI-4] RISICA, S., BOLZAN, C., NUCCETELLI, C., “建筑材料中的放射性: 房间模式分析和试验方法”, 《整体环境科学》第 272 期 (2001 年) 第 119—126 页。

参与起草和审订人员

| | |
|--------------------|-----------------|
| Arvela, H. | 芬兰辐射与核安全局 |
| Boal, T.J. | 国际原子能机构 |
| Bradley, J. | 英国卫生保健局 |
| Colgan, T. | 国际原子能机构 |
| Fojtíkova, I. | 捷克国家辐射防护研究所 |
| Froňka, A. | 捷克国家辐射防护研究所 |
| Hůlka, J. | 捷克国家辐射防护研究所 |
| Jiranek, M. | 捷克布拉格技术大学 |
| Markkanen, M. | 芬兰辐射与核安全局 |
| Miles, J. | 英国卫生保健局 |
| Murith, C. | 瑞士公共卫生办公室 |
| Neznal, M. | 捷克 Radon v.o.s. |
| Pierre, M.J.R. | 加拿大国防部 |
| Pravdova, E. | 捷克国家核安全办公室 |
| Rovenska, K. | 捷克国家辐射防护研究所 |
| Shannoun, F. | 世界卫生组织 |
| Thomas, J. | 捷克国家辐射防护研究所 |
| van der Steen, J. | 顾问（荷兰） |
| van Deventer, T.E. | 世界卫生组织 |
| Vlček, J. | 捷克国家辐射防护研究所 |
| Webster, S. | 加拿大萨斯喀彻温省工会 |
| Zeeb, H. | 世界卫生组织 |



IAEA

国际原子能机构

No. 27

当地订购

国际原子能机构的定价出版物可从下列来源或当地主要书商处购买。
未定价出版物应直接向国际原子能机构发订单。联系方式见本列表末尾。

北美

Bernan / Rowman & Littlefield

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, USA

电话: +1 800 462 6420 • 传真: +1 800 338 4550

电子信箱: orders@rowman.com • 网址: www.rowman.com/bernan

世界其他地区

请联系您当地的首选供应商或我们的主要经销商:

Eurospan Group

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

London EC1R 5DB

United Kingdom

交易订单和查询:

电话: +44 (0) 176 760 4972 • 传真: +44 (0) 176 760 1640

电子信箱: eurospan@turpin-distribution.com

单个订单:

www.eurospanbookstore.com/iaea

欲了解更多信息:

电话: +44 (0) 207 240 0856 • 传真: +44 (0) 207 379 0609

电子信箱: info@eurospangroup.com • 网址: www.eurospangroup.com

定价和未定价出版物的订单均可直接发送至:

Marketing and Sales Unit

International Atomic Energy Agency

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

电话: +43 1 2600 22529 或 22530 • 传真: +43 1 26007 22529

电子信箱: sales.publications@iaea.org • 网址: <https://www.iaea.org/zh/chu-ban-wu>

通过国际标准促进安全

国际原子能机构
维也纳