

环境保护部电离辐射安全与防护培训系列教材

电离辐射 防护与安全基础

DIANLI FUSHE FANGHU YU ANQUAN JICHU

杨朝文 主编



原子能出版社

环境保护部电离辐射安全与防护培训系列教材

电离辐射防护与安全基础

杨朝文 主编

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

电离辐射防护与安全基础/杨朝文主编. —北京:原子能出版社,2009.3
ISBN 978-7-5022-4567-2

I. 电… II. 杨… III. 电离辐射—辐射防护 IV. R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 037023 号

内 容 简 介

本书包含有关辐射防护与安全的物理基础与法律法规基础。在物理基础部分,介绍了原子核与放射性、射线与物质的相互作用、辐射剂量学基础、常用核辐射探测方法、辐射来源及其影响、辐射防护、放射性测量中的统计误差、有效数字的表示和运算规则等内容。在法律法规部分,介绍了辐射安全与辐射事故应急、辐射安全与防护的相关法律法规、国际国内辐射安全监管机构等。

本书是环境保护部组织编撰出版的全国放射防护与安全培训的统一教材,可供从事辐射安全与防护相关专业人员和行政管理干部参考,同时也可作为相关专业院校的教学用书和参考读物。

电离辐射防护与安全基础

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 张关铭
责任校对 徐淑惠
责任印制 丁怀兰
印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 14.75
字 数 368 千字
版 次 2009 年 3 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-4567-2
印 数 1~5 000 定 价 50.00 元

电离辐射安全与防护培训教材

编审委员会

主任 刘 华

委员 (按姓氏笔画排列)

王建龙	王晓涛	卢金祥	刘 伟	刘怡刚
许玉杰	李 静	杨 春	杨仲田	杨朝文
肖雪夫	肖德涛	吴丽萍	吴其反	何仕均
张家利	周启甫	周剑良	郑钧正	涂 彧
黄国夫	彭立新	潘 苏		

《电离辐射防护与安全基础》

编委会

主 编 杨朝文

编 委 吴丽萍 刘慢天 毛亚虹

总 序

中国是核技术利用大国,随着经济技术的发展,核技术在工业、农业、医学、资源、环保、军事以及科学研究等方面得到了广泛的应用,取得了瞩目的成就,同时,也发生了一些辐射事故。为了保护放射工作人员和公众的安全与健康,国家对核技术利用的安全与防护实施监管。从1960年颁布《放射性工作卫生防护暂行规定》以来,核技术利用的安全与防护管理已走过了近50个春秋。其间,积累了丰富的管理经验,也有不少挫折与教训。2005年国务院颁布了449号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》,核技术利用的安全与防护监管工作得到了进一步的加强。

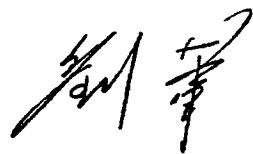
为了适应核技术利用和辐射安全监管的发展要求,快速提高从业人员和监管人员的专业水平,提高培训质量和规范培训工作,环保部辐射安全管理司委托清华大学牵头负责,组织7家电离辐射安全与防护培训机构(清华大学、中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院、四川大学、苏州大学、南华大学、浙江省辐射环境监测站)有关专家结合我国实际,参考国际原子能机构(IAEA)有关培训资料,编撰出版一套全国统一的培训教材。我相信,这套培训教材的使用,将对提高我国电离辐射安全与防护水平,促进核技术在各行各业的安全有着积极意义。

值此培训教材即将问世之际,谨向所有参加此套培训教材

编写、审稿和出版等工作的各有关单位领导和专家表示诚挚的感谢。

时间匆匆,加之作者学识有限,历经两年努力完成的此套培训教材仍有许多不尽如意之处,敬请读者批评指正。

环境保护部辐射安全管理司司长



2009年1月22日

前 言

随着核技术的普及推广,放射性同位素、射线装置等的应用越来越广泛,由此带来的辐射安全与防护问题越来越突出。为了提高从业人员的专业知识,加强技术人员、管理人员等对辐射安全与防护工作的认识,在环境保护部的领导和支持下,编写了此套丛书。《电离辐射防护与安全基础》是此套丛书之一。

《电离辐射防护与安全基础》是专为从事核技术应用(包括工业辐照、工业探伤、核子仪、核测井等),放射性同位素生产、销售、使用,射线装置设计、生产、销售、使用维护,放射诊断与治疗、核医学,环境监管,辐射安全与防护领域的管理人员、技术人员等编写的教材。

《电离辐射防护与安全基础》包含了有关辐射安全与防护方面的物理基础与法律法规基础。全书共分7章,3个附录。第1章介绍了原子核与放射性,第2章介绍了射线与物质的相互作用,第3章介绍了辐射剂量学基础,第4章介绍了常用核辐射探测方法,第5章介绍了辐射来源及其影响,第6章介绍了辐射防护,第7章介绍了辐射安全与辐射事故应急。附录1、2分别介绍了放射性测量中的统计误差、有效数字的表示和运算规则,附录3介绍了国际、国内辐射安全监管机构,并概要地介绍了辐射安全与防护的相关法律法规。

杨朝文编写了第1章与第5章,吴丽萍编写了第2章、第4章以及附录1、2,刘慢天编写了第3章与第6章,毛亚虹编写了第7章与附录3。李大庆编写了第4章部分内容。谢奇林收集与编写了第1章与第5章的部分内容。中国原子能科学研究院肖雪夫、彭立新,环境保护部核与辐射安全中心刘怡刚,清华大学刘原中审阅了全书,并提出了许多建设性修改意见。环境保护部放射源处赵永明、潘苏、杨春,核安全中心周其甫、王晓峰等,清华大学何仕均、王建龙、郑钧正,

南华大学邱小平,苏州大学涂彧,中国辐射防护研究院卢金祥等为该书提了不少意见和建议。学生韩丹、谭琳、乐观、徐海龙、李钱、任曼莉、姚洲、张海洲、朱峰、周巍等为本书收集了许多资料。编写者对所有参与人员为本书付出的辛勤劳动深表谢忱。

本书力图通俗易懂,适合更广泛的读者,但由于时间和编者水平所限,难以完全达到目标。书中错误与不妥在所难免,恳请读者批评指正。

《电离辐射防护与安全基础》

编委会

2008年12月

目 录

第 1 章 原子核与放射性	(1)
1.1 原子与原子核	(1)
1.1.1 原子	(1)
1.1.2 原子质量	(2)
1.1.3 原子核	(3)
1.2 原子核的结合能	(4)
1.2.1 一般的质能关系	(4)
1.2.2 原子核的质量亏损	(4)
1.2.3 原子核的结合能	(5)
1.2.4 原子核的稳定性	(6)
1.3 放射性及其种类	(7)
1.3.1 放射性的一般现象	(7)
1.3.2 α 衰变	(8)
1.3.3 β 衰变	(9)
1.3.4 γ 跃迁	(9)
1.4 放射性衰变规律	(10)
1.4.1 放射性衰变的一般规律	(10)
1.4.2 半衰期和平均寿命	(11)
1.4.3 分支衰变	(12)
1.4.4 放射性活度及单位	(12)
1.5 级联衰变与放射性平衡	(13)
1.5.1 级联衰变	(13)
1.5.2 暂时平衡	(14)
1.5.3 长期平衡	(14)
1.5.4 不成平衡	(15)
1.6 核反应	(15)
1.6.1 核反应概念	(15)
1.6.2 反应截面与产额	(16)
1.6.3 核反应类型与实现途径	(16)
1.7 核裂变与核聚变	(17)
1.7.1 核裂变	(17)

1.7.2	裂变产物及其特征	(19)
1.7.3	裂变能	(20)
1.7.4	核聚变	(20)
1.8	人工放射源的生产及其应用	(21)
1.8.1	反应堆生产放射性同位素	(22)
1.8.2	加速器生产放射性同位素	(22)
1.8.3	放射性生长规律	(22)
1.8.4	其他生产方法	(23)
	思考题	(23)
	参考文献	(24)
第2章	射线与物质的相互作用	(25)
2.1	α 粒子与物质相互作用	(25)
2.1.1	α 粒子的性质	(25)
2.1.2	α 粒子与物质相互作用	(25)
1.	电离和激发	(25)
2.	α 粒子的射程	(28)
2.2	β 射线与物质相互作用	(31)
2.2.1	β 射线的产生和特点	(31)
2.2.2	β 射线与物质相互作用	(31)
1.	电离能量损失	(31)
2.	辐射能量损失	(32)
3.	β 粒子的多次散射	(33)
2.2.3	β 射线的吸收和射程	(34)
1.	β 射线的吸收和最大射程	(34)
2.	β 射线在物质中的吸收规律	(35)
2.2.4	正电子与物质相互作用	(36)
2.3	γ 和 X 射线与物质相互作用	(36)
2.3.1	光电效应	(37)
1.	光电子的能量	(37)
2.	光电效应的截面	(38)
2.3.2	康普顿效应	(39)
1.	散射光子和反冲电子	(39)
2.	康普顿散射截面	(40)
2.3.3	电子对效应	(41)
1.	电子对的能量	(41)
2.	电子对效应的截面	(41)
2.3.4	γ 射线的吸收	(42)
1.	γ 射线吸收规律	(42)
2.	γ 射线吸收的特点	(45)

2.4 中子与物质相互作用	(45)
2.4.1 中子的特性	(45)
2.4.2 中子的来源	(46)
1. 放射性同位素中子源	(46)
2. 反应堆中子源	(47)
3. 加速器中子源	(47)
2.4.3 中子与物质相互作用	(48)
1. 中子的慢化	(48)
2. 中子的吸收	(50)
2.5 射线与物质相互作用特点小结	(52)
思考题	(53)
参考文献	(53)
第3章 辐射剂量学基础	(55)
3.1 电离辐射	(55)
3.2 辐射量和单位	(56)
3.2.1 辐射场中的量	(56)
1. 粒子注量 Φ	(56)
2. 粒子注量率 φ	(56)
3. 谱分布	(56)
4. 能量注量 Ψ	(57)
5. 能量注量率 ψ	(57)
6. 能量注量与粒子注量的关系	(57)
3.2.2 相互作用系数	(57)
1. 带电粒子与物质的相互作用系数	(57)
2. γ 射线与物质的相互作用系数	(58)
3.2.3 辐射剂量学中的量	(60)
1. 吸收剂量及其应用	(60)
2. 比释动能及其应用	(62)
3. 照射量及其应用	(67)
3.3 辐射的生物学效应	(70)
3.3.1 辐射对人体健康的影响	(70)
1. 辐射的作用过程	(70)
2. 辐射的作用效果	(71)
3.3.2 随机性效应与确定性效应	(71)
3.3.3 影响辐射生物学效应的因素	(72)
1. 物理因素	(72)
2. 生物因素	(74)
3.3.4 辐射防护中的量	(76)
1. 与个体相关的辐射量	(76)

2. 与群体相关的辐射量	(80)
3. 用于环境和个人监测的 ICRU 量	(81)
3.3.5 一些确定性效应的阈值	(83)
3.4 辐射剂量监测原理与方法	(84)
3.4.1 电离法测量辐射剂量	(84)
1. 照射量的标准测量方法	(84)
2. 布拉格-戈瑞原理与空腔电离室	(87)
3.4.2 测量辐射剂量的其他方法	(93)
1. G-M 计数器在剂量测量中的应用	(93)
2. 闪烁计数器在剂量测量中的应用	(94)
3. 胶片剂量计在剂量测量中的应用	(95)
4. 荧光玻璃剂量计在剂量测量中的应用	(95)
5. 热释光剂量计在剂量测量中的应用	(96)
6. 测量剂量的化学方法	(97)
思考题	(97)
参考文献	(98)
第 4 章 核辐射探测方法	(99)
4.1 气体探测器	(100)
4.1.1 气体探测器的工作原理	(100)
1. 气体的电离	(100)
2. 离子的收集和电压电流曲线	(100)
4.1.2 电离室	(102)
4.1.3 正比计数器	(103)
4.1.4 G-M 计数管	(104)
4.2 闪烁探测器	(105)
4.2.1 闪烁计数器的工作原理	(105)
4.2.2 闪烁体	(107)
1. 几种常用的闪烁体	(107)
2. 闪烁体的物理特性	(108)
3. 闪烁体的选择	(110)
4.2.3 光电倍增管	(110)
1. 光电倍增管的工作原理	(110)
2. 光电倍增管的物理性能	(111)
4.2.4 闪烁计数器的输出脉冲	(112)
4.3 半导体探测器	(113)
4.3.1 半导体探测器的工作原理	(113)
4.3.2 常见的半导体探测器	(114)
1. 面垒型半导体探测器	(114)
2. 漂移型半导体探测器	(114)

3. PIPS 离子注入表面钝化 Si 探测器	(115)
4. 高纯锗半导体探测器(HPGe)	(115)
4.4 中子探测器	(116)
4.4.1 中子探测的基本原理	(116)
4.4.2 常用中子探测器简介	(116)
1. BF_3 正比计数器	(116)
2. 硼电离室和裂变室	(116)
3. ^3He 气体探测器	(116)
4. 闪烁中子探测器	(116)
5. 半导体探测器	(117)
4.5 热释光探测器(TLD)	(117)
4.5.1 热释光探测器的基本原理	(117)
1. 发光强度曲线	(118)
2. 加热发光装置的主要组成部分	(118)
3. 常用的热释光的种类	(119)
4.5.2 热释光探测器的剂量学特性	(119)
4.6 射线强度或放射源活度的测量	(120)
4.6.1 探测器的探测效率	(120)
4.6.2 影响探测效率的因素	(120)
4.7 射线能量的测量	(121)
4.7.1 能量刻度及线性	(121)
4.7.2 能量分辨率	(122)
1. 能量分辨率定义	(122)
2. 影响谱仪能量分辨率的主要因素	(123)
4.8 辐射监测网络系统的发展	(124)
4.8.1 辐射测量仪表和测量方式的多样化	(124)
4.8.2 监测数据的多样化	(124)
思考题	(125)
参考文献	(125)
第 5 章 辐射来源及其影响	(126)
5.1 天然辐射源	(126)
5.1.1 宇宙辐射	(127)
5.1.2 宇生放射性核素	(128)
5.1.3 原生放射性核素	(128)
1. 钍系	(128)
2. 铀系	(129)
3. 锕系	(129)
4. 单次衰变的天然放射性核素	(132)
5.2 人工辐射源	(134)

5.2.1	矿物开采与应用对辐射水平的影响	(134)
5.2.2	核燃料循环对辐射水平的影响	(134)
1.	铀矿开采和加工	(135)
2.	^{235}U 的浓缩及铀燃料元件制造	(135)
3.	反应堆运行	(136)
4.	乏燃料后处理	(136)
5.	固体废物的处置和运输	(136)
5.2.3	核爆炸及核试验对辐射水平的影响	(137)
5.2.4	放射源及其应用	(139)
5.2.5	射线装置及其应用	(141)
1.	X 射线机	(141)
2.	加速器	(141)
5.3	辐射事故对辐射水平的影响与危害	(142)
5.3.1	核设施事故	(142)
5.3.2	核技术应用中发生的事故	(143)
5.3.3	放射性物质运输和废物贮存发生的事故	(144)
5.3.4	伴生矿事故	(144)
5.4	放射性物质在环境中的迁移	(144)
5.4.1	放射性物质在大气中的迁移	(144)
5.4.2	放射性物质在地表水体中的迁移	(145)
5.4.3	放射性物质在岩石、土壤和地下水中的迁移	(145)
5.4.4	放射性物质通过生物链向人的转移	(146)
	思考题	(146)
	参考文献	(147)
第 6 章	辐射防护	(148)
6.1	辐射防护的基本原则	(148)
6.1.1	辐射防护的目的	(148)
6.1.2	辐射防护体系	(148)
1.	实践的正当性	(148)
2.	剂量限制和潜在照射危险限制	(148)
3.	辐射防护最优化	(149)
4.	剂量约束和潜在照射危险约束	(149)
5.	医疗照射指导水平	(149)
6.2	辐射防护标准和各种限值	(149)
6.2.1	基本限值	(149)
1.	有效剂量限值和当量剂量限值	(149)
2.	次级限值	(150)
6.2.2	导出限值	(151)
1.	表面污染控制水平的导出限值	(151)

2. 氡子体和氘子体的摄入量及照射量限值	(152)
6.2.3 参考水平	(153)
6.3 外照射及其防护	(153)
6.3.1 X 或 γ 射线外照射的防护	(153)
1. γ 点源的空气吸收剂量率计算	(153)
2. 窄束 X 或 γ 射线的减弱规律	(154)
3. 宽束 X 或 γ 射线的减弱规律	(154)
6.3.2 带电粒子外照射的防护	(156)
1. 电子束的剂量计算	(156)
2. β 粒子和单能电子束的屏蔽	(157)
6.3.3 中子外照射的防护	(157)
6.4 内照射及其防护	(158)
6.4.1 放射性物质进出人体的途径	(158)
6.4.2 内照射防护的一般措施	(159)
6.4.3 放射工作场所的分级、分区	(161)
1. 非密封放射工作场所的分级	(161)
2. 放射工作场所的分区	(161)
思考题	(162)
参考文献	(162)
第 7 章 辐射安全与辐射事故应急	(163)
7.1 典型辐射事故简介	(163)
7.1.1 辐照装置事故	(163)
7.1.2 γ 探伤事故	(164)
7.1.3 放射治疗事故	(165)
7.1.4 核工业事故	(165)
7.1.5 其他辐射事故	(166)
7.2 放射源保安临时性导则简介	(166)
7.2.1 相关定义	(167)
1. 清点(accounting)	(167)
2. 设计基准威胁(design basis threat)	(167)
3. 总量盘点(inventorying)	(167)
4. 管理(management)	(167)
5. 核材料(nuclear material)	(167)
6. 主要责任者(principal parties)	(167)
7. 安全(safety)	(167)
8. 安全文化(safety culture)	(167)
9. 保安(security)	(167)
10. 保安文化(security culture)	(168)
7.2.2 目的和范围	(168)

1. 目的	(168)
2. 范围	(168)
7.2.3 保安设计和评价	(168)
1. 总体策略	(168)
2. 威胁评价	(169)
3. 保安级别的执行目标(根据威胁评价结果确定的保安级别)	(169)
4. 放射源保安级别的定位(按照放射源分类法确定保安级别)	(170)
7.2.4 保安措施	(171)
1. 管理措施	(171)
2. 技术措施	(171)
3. 通用管理措施	(172)
7.2.5 责任和管理机构	(172)
1. 审管部门	(172)
2. 主要责任者	(173)
3. 负责放射源的人员	(173)
7.2.6 总量盘点和记录	(173)
7.2.7 状态和事件报告制度	(174)
7.2.8 专门保安措施导则	(174)
7.3 辐射安全目标与质量保证	(175)
7.3.1 相关基本概念	(175)
7.3.2 辐射安全目标	(175)
7.3.3 质量保证	(176)
1. 安全评价	(176)
2. 对设计的要求	(177)
3. 对运行操作的要求	(178)
7.4 辐射事故应急响应	(179)
7.4.1 辐射事故定义	(179)
7.4.2 辐射事故分级及报告制度	(180)
1. 辐射事故分级	(180)
2. 辐射事故报告	(180)
7.4.3 辐射事故应急	(181)
1. 应急组织	(181)
2. 辐射事故应急响应	(184)
7.5 辐射安全文化的建立	(186)
7.5.1 安全文化概念	(186)
7.5.2 核安全文化的建设	(186)
1. 对决策层的要求	(186)
2. 对管理层的要求	(187)
3. 对个人的响应的要求	(187)

7.5.3 推进安全文化发展的一些良好实践	(188)
1. 高级管理层的承诺和参与	(188)
2. 风险分析方法的推行	(188)
3. 将错误作为学习的机会	(188)
4. 事件的深入分析	(188)
5. 强化安全培训	(188)
7.5.4 安全文化建设的意义	(189)
思考题	(189)
参考文献	(189)
附录 1 放射性测量中的统计误差	(190)
A1.1 放射性测量结果的表示	(190)
A1.2 误差的计算	(191)
A1.2.1 误差传递公式	(191)
A1.2.2 多次测量结果的误差	(192)
A1.2.3 计数率的统计误差	(192)
A1.2.4 考虑本底时误差的计算	(193)
附录 2 有效数字的定义及运算规则	(195)
A2.1 有效数字的定义	(195)
A2.2 有效数字的正确表示	(195)
A2.3 有效数字的运算	(195)
附录 3 辐射安全与防护监管机构及相关法律法规概要	(197)
A3.1 相关国际组织和国内监管机构介绍	(197)
A3.1.1 相关国际组织	(197)
1. 国际原子能机构(International Atomic Energy Agency,IAEA)	(197)
2. 国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)	(198)
3. 联合国原子辐射效应科学委员会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)	(198)
A3.1.2 国内监管机构	(198)
1. 核与辐射安全监管机构发展沿革	(198)
2. 国家核安全局核与辐射安全监管机构	(199)
A3.2 《电离辐射防护和辐射源安全基本标准》	(200)
A3.2.1 我国辐射防护基本标准的历史沿革	(200)
A3.2.2 新基本标准的制定原则	(201)
A3.2.3 新基本标准的适用范围	(201)
A3.2.4 新基本标准的主要特点	(201)
A3.2.5 一般要求	(201)
1. 实践	(201)
2. 源	(202)