



高等教育试用教材



# 核工业劳动卫生



傅铁城 主编

李振平 审校

原子能出版社

高等教育试用教材

# 核工业劳动卫生

|         |    |
|---------|----|
| 傅铁城     | 主编 |
| 傅铁城 孙 豁 | 编  |
| 伦汉清 张智慧 |    |
| 李振平     | 审校 |

原子能出版社

(京)新登字 077 号

## 内 容 简 介

本书主要叙述核工业生产过程中存在的各种有害因素,以及它们对人体健康的影响和卫生防护对策。本书反映了 30 年来中国核工业生产中卫生防护工作的主要经验和成果,可为今后工作提供借鉴。本书涉及的有害因素既有放射性的,也有非放射性的,它是一部核工业劳动卫生学各论。

本书可作为高等院校劳动卫生专业的试用教材,以及放射医学、放射卫生、辐射防护等专业的教学参考书;还可供劳动保护、环境保护和职业病等专业人员参考。

\* \* \*

本书由李振平主审,经中国核工业总公司放射医学教材委员会于 1990 年 7 月由主任委员李延义主持召开的审稿会审定,同意作为高等教育试用教材。

高等教育试用教材

核工业劳动卫生

傅铁城 主编

李振平 审校

责任编辑 韩国光

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

△

开本 787×1092 1/32·印张 11·字数 245 千字

1993 年 12 月北京第一版·1993 年 12 月北京第一次印刷

印数 1-1000

ISBN 7-5022-0781-3

R·24(课) 定价: 5.30 元

## 前 言

本书是根据中国核工业总公司教材委员会于1989年3月召开的放射医学教材委员会会议审定的编写提纲编写的。它可作为高等院校劳动卫生专业的试用教材,以及放射医学、放射卫生、辐射防护等专业的教学参考书;还可供劳动保护、环境保护、职业病防治工作人员或研究人员参考。

本书编写的宗旨在于把30年来我国核工业生产中在卫生防护工作方面所取得的成绩和经验介绍给读者,以供未来进一步改善劳动条件,保护核工业广大职工身体健康时借鉴。全书内容的重点在于核工业生产过程中存在的有害因素,以及它对人体健康的影响和卫生防护措施。书中所述各种有害因素既有放射性的,也有非放射性的;既有物理因素,也有化学因素、生物因素,皆以其对人体影响的严重程度而分别主次。当某种有害因素在书中第一次出现时,则比较详细地介绍其理化性质和毒理学特点。书中引用的资料以本国的为主,当国内某些资料不足时,则借用国外资料。

本书共分九章,第一章为绪论,其它各章分别讨论了铀矿勘探与开采、铀矿石水冶过程、核燃料元件生产、铀同位素分离、热核材料生产、核电厂与反应堆、乏燃料后处理及放射性核素生产、核设施退役中的劳动卫生问题。

本书由傅铁城主编。参加编写的有孙谿(第一、五、七、八章)、伦汉清(第二章)、傅铁城(第三、四、六章)和张智慧(第九章)。傅铁城对全书统稿并修改补写了第八章,伦汉清改写了第七章。

中国核工业总公司安防卫生局李振平高级工程师(研究员级)对全书进行了细致认真的审校和修改,提出许多具体、中肯的意见。苏州医学院李延义教授、姜德智副教授,白求恩医科大学苏士杰副教授,卫生部北京工业卫生实验所朱昌寿研究员,中国辐射防护研究院陈如松研究员以及原子能出版社韩国光副编审、中国核工业总公司胡希先高级工程师和贺兴章副处长等参加了审稿会并提出了许多宝贵意见。特此一并致谢。

由于编者水平所限,书中缺点错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1991年5月

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| <b>第一章 绪 论</b> .....           | (1)  |
| <b>第一节 核工业体系及其生产特点</b> .....   | (1)  |
| 一、核工业体系 .....                  | (1)  |
| 1. 裂变核燃料生产 .....               | (1)  |
| 2. 聚变核燃料(热核材料)生产 .....         | (3)  |
| 3. 核能发电 .....                  | (4)  |
| 4. 放射性核素生产 .....               | (4)  |
| 5. 核设施退役 .....                 | (5)  |
| 二、核工业生产的特点 .....               | (6)  |
| <b>第二节 核工业劳动卫生的特点与任务</b> ..... | (7)  |
| 一、核工业劳动卫生的特点 .....             | (7)  |
| 二、核工业劳动卫生的任务与工作内容 .....        | (8)  |
| <b>第二章 铀矿勘探开采的劳动卫生</b> .....   | (12) |
| <b>第一节 铀矿勘探开采的基本方法</b> .....   | (12) |
| <b>第二节 职业性有害因素</b> .....       | (15) |
| 一、矿尘 .....                     | (15) |
| 1. 矿尘的组成 .....                 | (16) |
| 2. 铀矿井下粉尘的主要来源 .....           | (17) |
| 3. 铀矿井下空气中粉尘的浓度 .....          | (20) |
| 二、氡及其子体 .....                  | (20) |
| 1. 氡及其子体的理化性质 .....            | (20) |
| 2. 矿井下氡的来源及影响其析出的因素 .....      | (22) |
| 3. 铀矿井下氡及其子体的浓度 .....          | (26) |
| 三、不良气象条件 .....                 | (27) |
| 1. 高温 .....                    | (27) |

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 2. 低温 .....                     | (28) |
| 四、噪声和振动 .....                   | (29) |
| 五、炮烟 .....                      | (30) |
| 六、 $\gamma$ 和 $\beta$ 外照射 ..... | (31) |
| 七、表面放射性污染 .....                 | (32) |
| 八、其它有害因素 .....                  | (33) |
| 第三节 常见的职业性损伤 .....              | (33) |
| 一、矽肺 .....                      | (34) |
| 1. 发病情况的简单回顾 .....              | (34) |
| 2. 铀矿工矽肺特点的问题 .....             | (34) |
| 3. 电离辐射与硅尘联合作用问题 .....          | (36) |
| 二、肺癌 .....                      | (38) |
| 1. 铀矿工肺癌的历史回顾 .....             | (38) |
| 2. 铀矿工人均剂量与集体剂量当量的估算 .....      | (40) |
| 3. 矽肺与肺癌的发病关系 .....             | (40) |
| 三、工伤 .....                      | (40) |
| 四、炮烟中毒 .....                    | (43) |
| 1. 一氧化碳中毒 .....                 | (43) |
| 2. 氮氧化物中毒 .....                 | (44) |
| 五、中暑 .....                      | (46) |
| 六、职业性皮肤病 .....                  | (48) |
| 七、其它职业性损伤 .....                 | (50) |
| 第四节 职业危害的预防措施 .....             | (52) |
| 一、降氧措施 .....                    | (52) |
| 二、防尘措施 .....                    | (53) |
| 三、降温措施 .....                    | (58) |
| 四、通风 .....                      | (59) |
| 五、降噪 .....                      | (62) |
| 六、卫生防护措施 .....                  | (63) |

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <b>第三章 铀矿石水冶生产的劳动卫生</b> .....    | (72) |
| <b>第一节 铀矿石水冶的工艺流程</b> .....      | (72) |
| <b>第二节 铀矿石水冶过程中的职业有害因素</b> ..... | (76) |
| 一、铀矿尘 .....                      | (76) |
| 二、放射性气溶胶 .....                   | (78) |
| 1. $^{226}\text{Ra}$ 的毒性 .....   | (79) |
| 2. $^{210}\text{Po}$ 的毒性 .....   | (80) |
| 三、铀 .....                        | (81) |
| 四、氢及其子体 .....                    | (83) |
| 五、表面放射性污染 .....                  | (84) |
| 六、 $\gamma$ 和 $\beta$ 外照射 .....  | (85) |
| 七、酸、碱蒸气 .....                    | (85) |
| 八、锰尘 .....                       | (88) |
| 九、氧化钙粉尘 .....                    | (88) |
| 十、有机溶剂 .....                     | (90) |
| 十一、噪声 .....                      | (91) |
| 十二、不良气象条件 .....                  | (91) |
| <b>第三节 水冶厂职工身体健康状况</b> .....     | (92) |
| 一、铀水冶厂职工发病率情况 .....              | (92) |
| 二、几种与职业因素有关的疾病情况分析 .....         | (94) |
| 1. 铀中毒 .....                     | (94) |
| 2. 矽肺 .....                      | (95) |
| 3. 癌症 .....                      | (95) |
| 4. 白细胞数减少的调查 .....               | (96) |
| 5. 酸、碱烧伤 .....                   | (97) |
| 6. 常见病与多发病 .....                 | (97) |
| <b>第四节 卫生防护措施</b> .....          | (98) |
| 一、建厂设计中的卫生学要求 .....              | (98) |
| 二、工艺流程的改进 .....                  | (99) |



|                    |       |
|--------------------|-------|
| 三、湿式作业 .....       | (100) |
| 四、密闭、通风与尾气净化 ..... | (100) |
| 五、去污措施 .....       | (103) |
| 六、个人防护 .....       | (103) |
| 七、医学监护 .....       | (104) |

#### 第四章 核燃料元件生产的劳动卫生 ..... (110)

##### 第一节 核燃料元件简介 ..... (110)

##### 第二节 金属铀燃料元件生产的工艺流程及其有害因素

|       |       |
|-------|-------|
| ..... | (111) |
|-------|-------|

##### 一、生产基本原理及主要工艺流程 ..... (112)

##### 二、生产过程中的主要职业性有害因素 ..... (113)

##### 1. 铀的化合物 ..... (113)

##### 2. 氟化氢和氢氟酸 ..... (116)

##### 3. 表面放射性污染 ..... (118)

##### 4. $\beta$ 和 $\gamma$ 外照射 ..... (118)

##### 5. 高温和辐射热 ..... (122)

##### 6. 高频电流(电磁场) ..... (123)

##### 第三节 动力堆燃料元件生产的工艺流程及其有害因素

|       |       |
|-------|-------|
| ..... | (123) |
|-------|-------|

##### 一、主要生产工艺流程 ..... (123)

##### 二、生产过程中的主要有害因素 ..... (124)

##### 1. 六氟化铀 ..... (124)

##### 2. 放射性气溶胶 ..... (124)

##### 3. $\beta$ 和 $\gamma$ 外照射 ..... (126)

##### 4. 氨和二氧化氮 ..... (127)

##### 第四节 核燃料元件厂职工的健康状况 ..... (127)

##### 一、铀对职工健康影响之探讨及尿铀值监测 ..... (127)

##### 二、职工中主要常见病 ..... (132)

##### 三、氢氟酸烧伤 ..... (133)

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 四、肝炎与职业因素的关系 .....             | (133) |
| 五、血象问题 .....                   | (134) |
| 六、某些免疫功能的变化 .....              | (134) |
| 1. 淋巴细胞转化率的检查 .....            | (134) |
| 2. 周围血液淋巴细胞转化的生物化学观察 .....     | (136) |
| 3. 呼吸道免疫功能试验 .....             | (136) |
| 第五节 卫生防护措施 .....               | (138) |
| 一、建厂设计中的卫生学要求 .....            | (138) |
| 二、工艺流程的改进 .....                | (139) |
| 三、密闭与通风 .....                  | (140) |
| 四、屏蔽防护措施 .....                 | (143) |
| 五、金属铀的回收和铀屑的处理 .....           | (143) |
| 六、表面去污措施 .....                 | (144) |
| 七、个人防护措施 .....                 | (144) |
| 八、卫生保健措施 .....                 | (145) |
| 九、医学监护 .....                   | (145) |
| 十、剂量监测工作 .....                 | (148) |
| <b>第五章 铀同位素分离生产的劳动卫生</b> ..... | (152) |
| 第一节 铀同位素分离的工艺流程 .....          | (152) |
| 第二节 铀同位素分离生产中的有害因素 .....       | (155) |
| 一、六氟化铀制备过程中的有害因素 .....         | (155) |
| 二、气体扩散过程中的有害因素 .....           | (160) |
| 三、气体扩散机检修时的有害因素 .....          | (162) |
| 四、浓缩铀炼制过程中的有害因素 .....          | (163) |
| 五、铀回收过程中的有害因素 .....            | (164) |
| 第三节 铀同位素分离生产的卫生防护措施 .....      | (165) |
| 一、六氟化铀制备时的卫生防护措施 .....         | (165) |
| 二、气体扩散厂生产运行时的卫生防护措施 .....      | (171) |
| 三、气体扩散机检修时的卫生防护措施 .....        | (172) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 四、浓缩铀炼制时的卫生防护措施 .....          | (174) |
| 五、铀回收时的卫生防护措施 .....            | (175) |
| 第四节 铀同位素分离生产的临界安全问题 .....      | (176) |
| 一、引起超临界事故的原因 .....             | (176) |
| 二、超临界事故的特征及其危害 .....           | (177) |
| 三、超临界事故的预防措施 .....             | (177) |
| 四、超临界事故的处理原则 .....             | (180) |
| <b>第六章 热核材料生产的劳动卫生</b> .....   | (182) |
| 第一节 氟生产的劳动卫生 .....             | (182) |
| 一、生产氟的原理和主要工艺流程 .....          | (183) |
| 二、主要职业性有害因素 .....              | (184) |
| 1. 氟的内照射 .....                 | (184) |
| 2. $\gamma$ 外照射 .....          | (189) |
| 3. 铀屑的燃烧 .....                 | (189) |
| 4. 锂和氟化锂的燃烧和爆炸 .....           | (189) |
| 三、氟内照射剂量水平的估算及氟摄入体内的原因分析 ..... | (190) |
| 四、防护措施 .....                   | (193) |
| 第二节 氟化锂生产的劳动卫生 .....           | (197) |
| 一、氟化锂-6生产的工艺流程 .....           | (198) |
| 二、生产过程中的职业性有害因素 .....          | (199) |
| 1. 汞 .....                     | (199) |
| (1) 汞的毒理作用 .....               | (200) |
| (2) 车间空气中汞的浓度 .....            | (202) |
| (3) 职工汞中毒的发病情况 .....           | (203) |
| 2. 锂 .....                     | (205) |
| (1) 锂的毒理作用 .....               | (205) |
| (2) 车间空气中锂的浓度 .....            | (206) |
| (3) 工作人员体格检查情况 .....           | (208) |
| 三、主要防护措施 .....                 | (209) |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 1. 防汞措施 .....                  | (209)        |
| 2. 防锂措施 .....                  | (211)        |
| <b>第七章 核电厂和核反应堆的劳动卫生 .....</b> | <b>(213)</b> |
| 第一节 核反应堆概述 .....               | (214)        |
| 第二节 核电厂的辐射有害因素 .....           | (215)        |
| 一、核电厂的辐射源 .....                | (215)        |
| 1. 堆本体 .....                   | (215)        |
| 2. 冷却剂系统 .....                 | (218)        |
| 3. 乏燃料的贮存和运输 .....             | (220)        |
| 4. 废物处理系统 .....                | (221)        |
| 二、核电厂的辐射危害 .....               | (221)        |
| 1. 各主要设备的辐射水平 .....            | (221)        |
| 2. 辅助厂房各系统的辐射水平 .....          | (222)        |
| 3. 燃料元件操作的辐射水平 .....           | (224)        |
| 三、核电厂的职业照射 .....               | (225)        |
| 1. 一般情况 .....                  | (225)        |
| 2. 按工种分布 .....                 | (228)        |
| 3. 超剂量照射事件 .....               | (230)        |
| 第三节 核电厂的非放射性有害因素 .....         | (231)        |
| 一、噪声 .....                     | (231)        |
| 二、高温 .....                     | (233)        |
| 三、化学有害物质 .....                 | (234)        |
| 四、非电离辐射 .....                  | (235)        |
| 第四节 核电厂的核事故 .....              | (235)        |
| 一、核事故的分类 .....                 | (236)        |
| 二、反应堆事故的风险评价 .....             | (239)        |
| 三、核电厂事故 .....                  | (244)        |
| 第五节 研究用反应堆的辐射有害因素 .....        | (245)        |
| 一、工作场所监测 .....                 | (246)        |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 二、个人剂量监测 .....                       | (247) |
| 三、事故 .....                           | (248) |
| 第六节 核电厂的劳动卫生管理 .....                 | (248) |
| 一、作业环境管理 .....                       | (248) |
| 二、作业管理 .....                         | (250) |
| 三、健康管理 .....                         | (250) |
| <b>第八章 乏燃料后处理及放射性核素生产的劳动卫生</b> ..... |       |
| .....                                | (254) |
| 第一节 乏燃料后处理生产简介 .....                 | (254) |
| 第二节 后处理工艺流程和有害因素 .....               | (256) |
| 一、后处理工艺流程 .....                      | (256) |
| 二、后处理生产中的有害因素 .....                  | (257) |
| 1. 乏燃料元件接收和贮存时的有害因素 .....            | (258) |
| 2. 首端处理时的有害因素 .....                  | (258) |
| 3. 化学分离工序的有害因素 .....                 | (261) |
| 4. 尾端处理时的有害因素 .....                  | (263) |
| 5. 三废处理中的有害因素 .....                  | (265) |
| 第三节 主要放射性核素及其危害 .....                | (266) |
| 一、钚及其危害 .....                        | (266) |
| 二、镅及其危害 .....                        | (274) |
| 三、镎及其危害 .....                        | (275) |
| 第四节 后处理设备检修时的劳动卫生 .....              | (276) |
| 一、检修的分类 .....                        | (277) |
| 二、检修的方式 .....                        | (277) |
| 三、检修的程序 .....                        | (278) |
| 四、检修工作中的有害因素 .....                   | (280) |
| 第五节 后处理生产对工作人员的健康影响 .....            | (281) |
| 一、超剂量外照射 .....                       | (281) |
| 二、放射性核素内污染 .....                     | (282) |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| 三、染色体畸变率的变化 .....                 | (284)        |
| 四、皮肤放射性损伤 .....                   | (285)        |
| 五、乏燃料后处理生产对工人健康的远期影响 .....        | (287)        |
| <b>第六节 后处理生产的防护措施 .....</b>       | <b>(288)</b> |
| 一、设计施工时的预防性措施 .....               | (288)        |
| 二、表面放射性污染的控制措施 .....              | (291)        |
| 三、溶解尾气的净化措施 .....                 | (293)        |
| 四、防止金属钚燃烧的措施 .....                | (294)        |
| 五、人体放射性核素污染的处理措施 .....            | (294)        |
| <b>第七节 放射性核素生产的劳动卫生 .....</b>     | <b>(297)</b> |
| 一、放射性核素生产中的有害因素 .....             | (298)        |
| 二、放射性核素生产的卫生防护措施 .....            | (300)        |
| <b>第九章 核设施退役中的劳动卫生 .....</b>      | <b>(302)</b> |
| <b>第一节 核设施退役的分级 .....</b>         | <b>(302)</b> |
| <b>第二节 退役的一般程序 .....</b>          | <b>(304)</b> |
| 一、工作程序 .....                      | (304)        |
| 二、解体技术 .....                      | (304)        |
| 三、去污方法 .....                      | (306)        |
| 四、放射性废物处理 .....                   | (315)        |
| <b>第三节 退役中的有害因素及可能发生的事故 .....</b> | <b>(316)</b> |
| 一、退役中的有害因素 .....                  | (316)        |
| 二、事故预测 .....                      | (321)        |
| <b>第四节 卫生防护措施 .....</b>           | <b>(322)</b> |
| 一、制度保证 .....                      | (322)        |
| 二、防止超临界 .....                     | (323)        |
| 三、现场防护 .....                      | (323)        |
| 四、个体防护 .....                      | (327)        |
| 五、医学监护 .....                      | (328)        |
| <b>第五节 辐射监测 .....</b>             | <b>(328)</b> |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 一、监测项目 .....           | (328) |
| 二、监测方法 .....           | (328) |
| 三、剂量估算 .....           | (334) |
| 第六节 控制标准 .....         | (335) |
| 一、剂量限值和控制原则 .....      | (335) |
| 二、表面放射性物质污染的控制水平 ..... | (335) |

# 第一章 绪 论

## 第一节 核工业体系及其生产特点

### 一、核工业体系

核工业是 20 世纪 40 年代初发展起来的新兴工业,其初期纯属用于军事目的,即为制造杀伤力巨大的核武器——原子弹而创建。随着核科学技术的飞速进展和各个部门的需求,目前,核工业已发展成为独立完整的工业体系,核工业产品除满足国防需要外,已经应用到国民经济的各个不同领域。

#### 1. 裂变核燃料生产

裂变核燃料是核工业生产的基础材料。它包括裂变燃料和转换原料。裂变燃料有 $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 和 $^{233}\text{U}$ 三种放射性核素,都属于易裂变物质;转换原料有 $^{238}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 两种放射性核素,属于非易裂变物质,但在核反应堆内经中子照射后,可转变为易裂变燃料并可补充裂变燃料的消耗。存在于自然界铀矿石中的天然铀是 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ 和 $^{234}\text{U}$ 的混合物。为获得 $^{238}\text{U}$ 和 $^{235}\text{U}$ ,首先要进行铀矿的地质勘探和开采,这是核工业生产的初始程序。 $^{233}\text{U}$ 由钍矿中的 $^{232}\text{Th}$ 经开采冶炼后再经反应堆中子照射才能获得。 $^{239}\text{Pu}$ 是以 $^{238}\text{U}$ 为原料,经反应堆中子照射后,人工生产出来的核燃料。由此可见,自然界中存在的裂变燃料只有 $^{235}\text{U}$ 一种,而 $^{239}\text{Pu}$ 和 $^{233}\text{U}$ 都要靠 $^{235}\text{U}$ 在反应堆内裂变产生的中子分别照射 $^{238}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 转换而成。裂变核燃料



的主要生产体系和职业危害如下。

(1) 铀矿勘探与开采 铀是发展核工业最基本的原料,铀矿勘探是核工业生产的第一道工序。勘探的任务是查明铀资源,寻找铀矿床并弄清铀储量。铀矿勘探过程中,地质人员深入矿区,主要是在野外露天工作,身受酷暑或严寒的侵袭,在夏季极易引起日射病或中暑等损伤。

铀矿开采分为露天开采、地下开采和化学开采三种方式。露天开采的劳动条件与地质勘探人员的基本相似,而铀矿地下开采除与其它矿山的劳动条件相似外,还会受到不同程度的氡及其子体的放射性影响。化学开采的劳动条件要比前述两种为好。

(2) 铀矿石水冶与铀浓缩物的提取 为提取矿石中的铀,利用酸或碱液浸出的方法制取铀化合物,然后加工制成重铀酸铵,三碳酸铀酰铵以及三氧化铀等铀的浓缩物,为制备各种类型核燃料提供生产原料。在上述生产过程中,使用大量酸碱及有机溶剂等化学物质,产生放射性粉尘和放射性气溶胶等。

(3) 核燃料元件的制造 由水冶厂送至元件厂的铀化学浓缩物,经氢氟化制成四氟化铀,一部分还原、精炼成天然金属铀锭,用以制造天然金属铀元件;一部分送往铀同位素分离厂氟化成  $UF_6$ ,经分离过程,将 $^{235}U$ 富集为浓缩铀,再返回元件厂制成核燃料元件。

核燃料元件是反应堆的核心部件,由燃料芯体和包壳两部分组成。依反应堆用途的不同,可分为生产堆元件、试验堆元件以及动力堆元件等。在燃料元件制作过程中,可遇到 $\beta$ 射线外照射,金属铀屑燃烧(自燃),放射性粉尘或气溶胶对空气的污染,以及氟化氢或氢氟酸等化学物质。

(4) 铀同位素分离  $^{235}U$ 在天然铀中的丰度仅占0.72%,