

ATOMIC ENERGY INDUSTRY

原子能工业

连培生 编著

原子能出版社

原子能工业

(修订版)

连培生 编著



原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

原子能工业/连培生编著.—2版.—北京:原子能出版社,2002.5
ISBN 7-5022-2453-X

I.原… II.连… III.原子能工业-基本知识 IV.TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 0010891 号

内 容 简 介

本书全面、系统地阐述了原子能工业各个环节的工艺内容及其相互关系,这些环节包括各种类型的核反应堆,属于核燃料循环的铀矿地质勘探、铀矿开采、铀的冶炼和加工、重同位素分离、燃料元(组)件制造、辐照过核燃料的运输和后处理及放射性废物的处理和处置,核武器和轻同位素分离,海洋和空间核能装置,核电站的建设、运行和退役,专用设备仪器和特殊材料的生产,属于辐射工业的放射性同位素和辐射源的生产及辐射防护等。书中深入浅出地说明了有关的科技原理、基础知识和当前的发展情况。

本书可供专门从事原子能工业某一专门领域的工作者或业外人士为扩大知识范围、增进全面了解和加强协作配合的参考之用,可用作大专原子能相关专业师生的参考材料或新转入原子能行业人士的初始学习材料,也可作为对原子能工业感兴趣、但存在疑问的各界人士和广大公众了解该工业概貌的科普读物。

本书是 1978 年初版的修订版。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:谭俊 刘朔

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京朝阳科普印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 34.5 字数 858 千字

2002 年 5 月北京第 2 版 2002 年 5 月北京第 2 次印刷

印数:20001—25000

定价:平装 78.00 元,精装 98.00 元

修订版编著者的话

自本书初版出版以来,科学技术的进步使原子能工业迅猛发展,本书的内容需作相应的补充和修改。同时,1979年发生在美国三里岛和1986年发生在苏联切尔诺贝利的两次核电厂事故,引起人们对核电厂安全性的深切顾虑,当今世界对核电作为可持续发展的能源,争议颇多。有必要进一步探讨和客观地阐明核能对人类社会发展的重大意义。因此,希望本书修订版不仅能满足直接或间接从事原子能工业的读者的需要,而且能向非本专业而关注原子能的各界人士阐明原子能科学的原理、供选择的技术路线以及我国发展原子能工业的必要性,并澄清一些误解。需要说明,本书着重介绍原子能工业本身,对于核基础科研、处于研究开发阶段尚未实现工业应用的新概念和新装置(如受控核聚变装置等)、以及放射性同位素和核辐射在各领域的广泛应用等方面内容未作详细介绍。

本书修订版的第8、12、16章是在初版的第六章(吕永新撰写)、第八章(刘锡丞、朱志祥和张镛撰写)、第十三章(邵刚撰写)基础上略作修改而成的,著者谨向上列作者表示感谢,同时感谢初版责任编辑高绣雯同志曾付出的辛勤劳动。著者特别感谢张永兴同志重新撰写了辐射防护一章。在编写修订版过程中,著者受到中国核工业集团公司及前中国核工业总公司领导特别是公司核电部、科技部和科技委的大力支持和许多同志的热心鼓励和帮助,包括提供最新的资料,提出修改意见,或审读部分稿件。在此谨向朱家骆、林诚格、董柏年、沈文权、张书田、张禄庆、孙光弟、左湖、马载琦、金继光、傅满昌、汪志馨、胡传文、董茵、陈殿华、石永康、苏著亭、李文焱、侯凤旺、贺正祥、谷才伟、姚乃兴、王传英、严叔衡、伍庆昌、刘振河、邵向业、陈叔平、郑福裕、施建忠、曹关平、温鸿钧以及其他未一一列出姓名的学者、专家表示衷心的感谢。感谢原子能出版社有关同志为本书初版和修订版的积极推动及付出的辛勤劳动。还要感谢妻子孟英同志对这项工作的持续关注和支持。

如发现本书内任何错误或不当之处,敬请读者批评指正。

连培生

2001年9月

初版编著者的话

在毛主席革命路线指引下,我国原子能工业遵循“独立自主、自力更生”的方针,从无到有地建立起来,取得了重大成就。原子能工业综合性强,涉及范围广,许多问题都需要多方面的配合协作,才能圆满解决。长期工作于原子能工业某一专门领域的同志,很希望了解其他方面的情况;不少协作部门的同志,要求进一步了解原子能工业的内容;从事政治、组织和管理工作的同志,需要了解全面的情况。为了满足这些需要,我们在1967年《原子能工业》(试用本)的基础上,编写了这本书,企图阐明原子能工业各个环节的主要内容及其相互关系,使读者对原子能工业获得比较完整的概念。由于核反应堆是原子能工业的主要环节,有关裂变链式反应的物理概念对一部分同志还是比较陌生的,所以首先在第二章中对核反应堆工作原理作了简明的阐述,以便读者顺利地阅读其他章节。关于原子核物理的基本概念,则在第一章绪论中简略地加以介绍。书中有意地回避了复杂的数学公式,以便具有中等文化程度和实践经验的广大工人、科学技术人员和管理人员阅读。

原子能工业是新兴的工业,各种工艺和设备尚未定型,所采用的各项技术都在迅速发展。本书虽然打算尽量介绍世界各国的新成就,限于我们的水平,加之编写、出版需要时间。所以当读者见到本书时,会发现有些材料已经过时,但用这些材料来阐明基本概念尚有价值。

本书引用了多方面的资料,在正文中就不一一注明出处。书后附有部分主要参考书目以便查阅。

本书是许多同志集体劳动的成果。第六章(核武器)由吕永新同志撰写;第八章第1节(铀矿地质与普查勘探)由刘锡丞同志撰写,第2~5节(铀矿的开采和铀、钍矿石的加工)由朱志祥和张镛同志撰写;第十三章(放射性废物的处理和利用)由邵刚同志撰写;第十八章(放射防护和核安全)由张永兴同志撰写。第四章(生产堆)和第十四章(放射性同位素生产)分别利用了周平和孙树正同志提供的材料。有关专业的同志仔细审阅了本书的主要章节,提出了重要的修改意见。还

有许多同志,为了本书的出版做了大量的工作,提高了本书的质量。在此,谨向上述同志表示感谢。由于本书涉及的范围较广,必然还有不少错误、缺点和不完善之处,希望读者随时给予指正。

连培生

1977年9月

序

这是一本阐述原子能工业的科学技术基础知识的书。

在 20 世纪的各项发明创造中,原子能的发现和应用具有划时代的重大意义。这种崭新能源的出现恰好发生在传统的化石燃料资源日趋枯竭和人们逐渐加深认识到伴随化石燃料使用的环境恶化问题难以克服的年代。尽管原子能最初用于制造毁灭性的核武器,它为全人类造福的积极作用是不容置疑、不可忽视的。

由于毛泽东主席和周恩来总理的远见卓识,新中国成立甫六年就决定要自力更生地发展原子能和建立原子能工业。在当时核大国执行核垄断和核讹诈政策的威胁下,不得不把发展核武器放在首位。但正如我国政府在历次声明中所指出:“中国发展核武器,是为了打破核大国的核垄断,要消灭核武器”,“中国政府将一如既往,尽一切努力,争取通过国际协商,促进全面禁止和彻底销毁核武器的崇高目标的实现”。事实上,我国在 20 世纪 60 年代研制成功原子弹、氢弹,70 年代初建成核动力潜艇后,立即转向原子能和平利用的开发研究,于 90 年代初率先在东南沿海建成我国第一座核电厂,结束了中国大陆没有核电的历史。同时,放射性同位素及核辐射在科研、医疗和国民经济各领域中的应用有很大的发展,效果显著。

伴随我国经济腾飞,对能源需求日益增长。中国虽然地大物博,但按人口平均拥有的常规能源,却不及世界人均量的二分之一,且煤炭与水力资源分布极不平衡。我国经济发达的沿海地区,电力短缺,交通紧张,环境污染严重,已成为制约沿海地区经济发展的三大制约因素。核电是一种安全、经济、清洁、可持续发展的能源。在我国,特别是经济发达地区,发展核电是解决能源问题的最佳选择,是历史发展的必然。这也是《原子能工业》于 1978 年出版后在今天又修订再版的目的。本书初版在宣传和普及原子能有关知识,在促进行业内各专业间的经验交流,在向行业外各界人士介绍原子能工业全貌等方面,起了一定作用,受到欢迎和好评。其后二十多年来,核科学技术有了很大的发展,世界上核电发展迅速,成为能源结构中的重要组成部分。另一方面,三里岛和切尔诺贝利事故引起人们对核

电厂安全性的担心；一部分工业发达国家因经济增长和能源需求变缓及政治原因，声称停止发展核电；媒体的负面报道更引起人们的困惑。作者在本书初版的基础上作了全面修订，补充了最新的科学技术内容，介绍了原子能在 21 世纪的发展趋势，论述了我国核电以明确的全国长远规划为指导进一步国产化及加强现代化管理的必要性与措施。此外，还就核电的安全性、防止核武器扩散和核废物处置等方面的一些误解，从科学技术角度予以澄清，以促进共识。

由于本书涉及专业面广，论述精湛，适宜于各界人士和广大公众阅读。希望本书的再版能有助于普及和提高我国公众对原子能利用的认识，早日使和平利用原子能为促进我国国民经济的发展发挥其应有的作用。

中国核工业集团公司总经理

李定华

2001 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1-1 原子能在历史发展中的地位	1
1-2 原子能的发现和发展	3
1-3 核能的来源	8
1-4 原子核分裂及裂变能的应用	11
1-4-1 核反应堆	12
1-4-2 原子弹	14
1-5 原子核聚合及聚变能的应用	14
1-5-1 氢弹	14
1-5-2 核爆炸的工程应用	15
1-5-3 受控热核反应	15
1-6 放射性	16
1-6-1 放射性衰变和核辐射	16
1-6-2 天然放射性	16
1-6-3 辐射的风险	16
1-7 放射性同位素和辐射的应用	17
1-7-1 利用辐射的易探测性能——示踪技术	18
1-7-2 利用辐射的穿透性能——透视和自动控制	20
1-7-3 利用辐射的生物效应——治癌、灭菌、杀虫、培育动植物新品种	20
1-7-4 利用辐射的化学效应——辐射化工	21
1-7-5 利用辐射的能量——放射性同位素能源	22
1-8 核燃料生产	23
1-9 原子能工业的范围和特点	24

第2章 核反应堆和核燃料循环的原理	26
2-1 反应堆内的核反应	26
2-2 裂变反应	27
2-2-1 裂变过程	27
2-2-2 裂变中子	28
2-2-3 裂变产物	28
2-2-4 裂变释放的能量	30
2-3 自持链式反应的条件	31
2-3-1 临界质量与临界安全	31
2-3-2 中子的慢化过程与辐射俘获	34
2-3-3 热中子非均匀反应堆系统的中子平衡	35
2-4 反应堆的控制	38
2-4-1 后备反应性	38
2-4-2 反应性的控制方法	39
2-4-3 中子数的增长过程	41
2-4-4 反应性的变化	42
2-5 反应堆的保护和保护系统	45
2-6 反应堆的热工限度	48
2-6-1 热功率密度的空间分布	48
2-6-2 燃料熔化	51
2-6-3 燃料棒包壳烧毁	51
2-6-4 流动不稳定性	53
2-7 核燃料的转换和增殖	53
2-7-1 核燃料的消耗	53
2-7-2 核燃料的转换	54
2-7-3 核燃料的增殖	56
2-8 反应堆的类别和构成	61
2-8-1 反应堆的类别	61
2-8-2 反应堆的构成	63
2-8-3 对反应堆各部分材料的要求	63
2-9 核燃料循环	68
2-9-1 铀-钚循环和钍-铀循环	68
2-9-2 铀-钚循环的三种不同方式	70
2-9-3 钚的利用	71
2-9-4 钍的利用	75
2-9-5 反应堆的初装料和换料需要量	78
2-9-6 燃料循环的总投料量	78

第3章 研究试验反应堆	81
3-1 研究试验堆在原子能发展中的地位和作用	81
3-2 研究试验堆的类型和特点	82
3-3 零功率堆	86
3-4 游泳池式研究试验堆	86
3-5 重水型研究试验堆	87
3-6 高通量工程试验堆	88
3-7 均匀型研究试验堆	89
3-8 微型研究试验堆	90
3-9 快中子材料试验堆及快中子实验堆	91
3-10 各种热中子堆型的实验堆	92
第4章 核燃料生产反应堆	94
4-1 核燃料生产堆的用途	94
4-2 核燃料生产堆的特点	95
4-3 石墨生产堆	95
4-4 重水生产堆	97
第5章 核电厂的发展	99
5-1 世界上核电厂的现状	99
5-2 核电厂的安全性	102
5-3 核电厂的可靠性	107
5-4 核电厂的经济性	109
5-5 核电厂的环境影响与可持续发展	113
5-6 压水堆核电厂	116
5-6-1 堆芯	121
5-6-2 控制棒组件及其他控制手段	123
5-6-3 压力容器	124
5-6-4 堆芯冷却系统	124
5-6-5 安全壳	129
5-7 沸水堆核电厂	132
5-8 重水堆核电厂	137
5-9 高温气冷堆核电厂	145
5-10 快中子增殖堆核电厂	149
5-11 动力反应堆的研究与开发	155
5-12 未来核电厂的技术发展趋势	157

第 6 章 核电厂的建设和运行	164
6-1 建设项目实施前需要解决的问题	164
6-2 核电厂厂址选择	164
6-2-1 核电厂对环境的影响	165
6-2-2 环境对核电厂的影响	166
6-2-3 厂址的比较和选定	166
6-3 项目管理	167
6-4 质量保证制度	173
6-5 核电厂建设的本国化	174
6-5-1 工程设计和项目管理的自主化	175
6-5-2 设备国产化	176
6-6 堆内燃料管理	177
6-7 核电厂事故的防止	179
6-7-1 纵深防御的第一道防线——预防事故	179
6-7-2 纵深防御的第二道防线——控制事故	180
6-7-3 纵深防御的第三道防线——缓解事故	182
6-8 安全文化	184
第 7 章 海洋和空间核能装置	186
7-1 潜艇核动力装置	186
7-2 水面舰艇核动力装置	194
7-3 空间核能装置	195
7-3-1 空间核电源	195
7-3-2 空间核推进装置	197
第 8 章 核武器	198
8-1 核武器的类型和构造原理	198
8-1-1 原子弹	198
8-1-2 氢弹	201
8-1-3 核爆炸驱动定向能武器	203
8-1-4 战略核武器和战术核武器	203
8-2 核武器发展水平	204
8-2-1 比威力	204
8-2-2 核装料利用率	204
8-2-3 干净化程度	204
8-2-4 突防能力	205
8-2-5 可靠性	205
8-2-6 安全性	205

8-2-7 生存能力	205
8-3 核武器的杀伤破坏因素	206
8-3-1 冲击波	206
8-3-2 光热辐射	206
8-3-3 贯穿辐射	206
8-3-4 X射线	207
8-3-5 核电磁脉冲	207
8-3-6 放射性污染	207
8-4 核武器试验	208
8-4-1 大气层核试验	208
8-4-2 地面核试验	209
8-4-3 地下核试验	209
8-4-4 水下核试验	209
8-4-5 外层空间核试验	210
8-4-6 全面禁止核试验	210
8-5 防止核武器扩散	210
8-5-1 防止核武器扩散的意义	210
8-5-2 国际防扩散保障体系	211
8-5-3 发展核电不会导致核武器扩散	212
第9章 富集铀的生产(重同位素分离)	213
9-1 生产富集铀的必要性和重要性	213
9-2 生产富集铀的几种主要方法及其比较	215
9-2-1 气体扩散法	216
9-2-2 离心机法	219
9-2-3 分离喷嘴法	220
9-3 级联装置	221
9-4 铀同位素分离厂的基本特点	223
9-4-1 工作介质六氟化铀	223
9-4-2 高度的密封性、耐腐蚀性和清洁度要求	223
9-4-3 运行的安全性与可靠性	224
9-5 六氟化铀的生产和还原	224
9-5-1 六氟化铀的生产	224
9-5-2 六氟化铀的还原	227
9-6 铀同位素分离的激光法	227
第10章 重水、氘、锂-6、硼-10的生产(轻同位素分离)	231
10-1 生产重水的几种主要方法及其比较	231

10-1-1 蒸馏法	232
10-1-2 电解法	235
10-1-3 化学交换法	235
10-1-4 各种方法的比较	238
10-2 重水厂的基本特点	238
10-3 降质重水的再富集	239
10-4 氟的生产	240
10-4-1 氟的来源	240
10-4-2 重水除氟工艺	241
10-4-3 氟的生产工艺	241
10-5 锂-6 的生产	244
10-5-1 锂的冶炼	244
10-5-2 锂同位素分离	245
10-5-3 金属锂-6 的制备	246
10-5-4 氟化锂-6 的制备	246
10-6 硼-10 的生产	247

第 11 章 某些专用设备仪器和特殊材料的生产	248
11-1 反应堆容器	248
11-2 反应堆冷却剂泵	253
11-3 蒸汽发生器	256
11-4 反应堆冷却剂回路管道和阀门	261
11-5 反应堆控制棒驱动机构	262
11-5-1 电动机式驱动机构	263
11-5-2 磁阻马达式驱动机构	263
11-5-3 磁力提升式驱动机构	264
11-6 反应堆装卸燃料设备	264
11-6-1 不停堆换料机	265
11-6-2 钠冷快堆装卸燃料设备	267
11-7 饱和蒸汽汽轮机	268
11-8 带电粒子加速器	270
11-9 热室设备	272
11-9-1 屏蔽观察窗	273
11-9-2 机械手	274
11-10 辐射探测仪器	274
11-10-1 地质探矿仪器	277
11-10-2 反应堆控制仪器	278
11-10-3 防护监测仪器	280
11-11 石墨	281

11-12	锆合金管	282
第 12 章	铀矿的勘探、开采和加工	285
12-1	铀矿地质研究与普查勘探	285
12-1-1	铀矿地质研究	285
12-1-2	普查勘探	287
12-2	铀矿的开采和选矿	292
12-2-1	铀矿的开采	292
12-2-2	铀矿石的选矿	294
12-3	铀矿石的加工(铀的水冶)	294
12-3-1	矿石准备	294
12-3-2	矿石浸出	295
12-3-3	铀的提取	297
12-3-4	铀产品的沉淀产出	299
12-3-5	水冶工艺流程和污染防治	299
12-4	铀的精制	301
12-5	钍矿石加工和金属钍的生产	302
第 13 章	燃料元(组)件的设计和制造	303
13-1	对燃料元(组)件的要求	303
13-2	燃料元(组)件的基本结构	305
13-2-1	生产堆的燃料元件	305
13-2-2	轻水堆的燃料组件	306
13-2-3	重水堆的燃料棒束	311
13-2-4	高温气冷堆的燃料元件	312
13-2-5	钠冷快中子堆的燃料组件	315
13-2-6	研究试验堆的燃料元件	317
△ 13-3	核燃料物态的选择	319
13-3-1	燃料芯体的物理化学状态和辐照性能	319
13-3-2	金属铀和铀合金	320
13-3-3	氧化铀	321
13-3-4	碳化铀和氮化铀	323
13-3-5	铀及其化合物	324
13-3-6	铀钍混合陶瓷燃料	324
13-3-7	钍铀混合陶瓷燃料	325
13-3-8	弥散体燃料	326
13-4	包壳材料的选择	327
13-4-1	铝合金	327

13-4-2	锆合金	327
13-4-3	镁合金	329
13-4-4	不锈钢和镍基合金	329
13-4-5	高温气冷堆燃料元件的石墨基体材料	331
13-5	燃料元(组)件的设计、研制和试验	331
13-5-1	燃料元(组)件的设计	332
13-5-2	燃料元(组)件的性能试验	333
13-5-3	试验技术和设备	335
13-6	燃料元件的包装、焊接和结合层	339
13-6-1	包装	339
13-6-2	焊接	339
13-6-3	结合层	339
13-7	金属铀燃料元件的制造工艺	340
13-7-1	金属铀的制备	340
13-7-2	金属铀的加工成形	342
13-7-3	金属铀燃料元件的包装和检验	343
13-8	陶瓷型燃料元(组)件的制造工艺	344
13-8-1	燃料芯块的制备	344
13-8-2	包壳管的准备	350
13-8-3	燃料棒的组装	350
13-8-4	燃料组件的组装和质量检验	351
13-9	弥散型燃料元件的制造工艺	353
13-9-1	研究试验堆燃料元件的制造工艺	353
13-9-2	高温气冷堆燃料元件的制造工艺	354
13-10	快中子堆燃料元(组)件的制造工艺	355
13-11	燃料元(组)件的质量保证和质量控制	356

第 14 章 核燃料的运输..... 358

14-1	放射性物质运输的一般问题	359
14-2	未辐照核燃料的运输	359
14-3	辐照过燃料组件的运输	360

第 15 章 辐照过燃料的后处理..... 363

15-1	乏燃料处理的不同路线	363
15-2	后处理的重要性和对后处理的要求	364
15-3	辐照过燃料元(组)件的“冷却”	367
15-4	辐照过燃料元(组)件的首端处理	369
15-5	化学分离	371

15-5-1	溶剂萃取法	371
15-5-2	氟化挥发法	376
15-5-3	高温冶金法	377
15-6	裂变产物和锕系元素的回收利用	378
15-6-1	从溶解尾气中提取氦	379
15-6-2	高放废液中裂变产物的提取	380
15-6-3	高放废液中锕系元素的提取	380
15-7	后处理厂的特点和规模	381
15-7-1	放射性强	381
15-7-2	毒性大	382
15-7-3	临界事故的危險	383
15-7-4	可靠性、密封性和维修条件要求高	384
15-7-5	加强废物管理,严格控制废气、废液的排放	385
15-7-6	后处理厂的规模	386
15-8	后处理厂的主要设备	387
15-8-1	溶解器(浸取槽)和调料槽	387
15-8-2	萃取器	387
15-8-3	输液设备	393
15-9	钚基燃料的后处理	393

第 16 章 放射性废物的处理和处置 395

16-1	放射性废物处理的重要性	395
16-2	放射性废物的来源和分类	396
16-2-1	放射性废物的来源	396
16-2-2	放射性废物的分类	398
16-3	放射性废物的主要特点	399
16-3-1	放射性废物的核素组成	399
16-3-2	放射性及其随时间的衰减	400
16-3-3	放射毒性	401
16-4	减少放射性废物量的措施	402
16-5	放射性废气(气载废物)的处理	402
16-5-1	放射性废气的稀释排放	402
16-5-2	放射性气载废物的净化处理	403
16-6	放射性废液的处理	404
16-6-1	低放射性废液的稀释排放	404
16-6-2	放射性废液的净化、浓缩处理	405
16-6-3	放射性废液的贮存	408
16-6-4	放射性废液的固化	409
16-7	放射性固体废物的处理	414