



SNSTC

核安保培训教材（试用版）

# 核燃料循环概论

国家核安保技术中心 编著

中国原子能出版社

核安保培训教材(试用版)

# 核燃料循环概论

国家核安保技术中心 编著



中国原子能出版社

## 内容简介

本书对核燃料循环体系进行了系统、全面的介绍,通过对本书的学习,可对燃料循环形成整体的认识 and 了解。

全书分为六章,分别介绍了核燃料循环概况、铀资源获取(地质勘探和铀矿采冶)、核燃料加工(铀的纯化、转化、浓缩、核燃料元件制造)、核动力生产、乏燃料后处理和放射性废物处理处置。

本书主要作为核安保从业人员学习核燃料循环基础知识及涉核单位人员基础知识培训教材使用,也可作为相关领域工作人员和高等院校师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

核燃料循环概论 / 国家核安保技术中心编著. -- 北

京: 中国原子能出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5022-8476-3

I. ①核… II. ①国… III. ①核燃料-燃料循环-研究 IV. ①TL249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 219534 号

### 核燃料循环概论

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

策划编辑 付 真

责任编辑 胡晓彤

美术编辑 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京卓诚恒信彩色印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 8.5 字 数 136 千字

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-8476-3 定 价 48.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: [atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)

发行电话: 010-68452845

## 核安保培训教材编委会及编写组成员

主 任:邓 戈

副 主 任:许振华

编 委:(按姓氏笔画排序)

古德军 叶国安 苏 燕 李 涛 李 森 杨志民

邹树梁 张志俭 张建岗 郝 坚 顾国兴 徐 侃

编写组组长:许振华

编写组副组长:(按姓氏笔画排序)

王利红 王迎庆 刘宏斌 李长久 宋玉收 陈江海

赵永刚 胡洪涛 顾少刚 章俊武

编写组成员:(按姓氏笔画排序)

于 涛 王任泽 王学新 王思聪 王基魁 王晨毅

王黎明 仇春华 左雅慧 史贝贝 冯宗洋 庄大杰

刘卫东 刘立坤 刘 林 汤荣耀 孙洪超 孙树堂

李 伟 李国强 邱小平 杨 林 杨亚鹏 肖巍巍

沈建宇 张梦寒 陈 航 陈甲华 范 韬 拥 军

周 超 周志波 周青芝 周精辟 宗 波 居治豪

孟东原 赵立宏 郜 强 禹 雪 袁 喆 贾林胜

徐潇潇 高雪梅 郭方方 曹 弋 曹 迪 董 林

韩叶良 景 弋 谢金森 黎 春

# 编辑出版工作组

主任:潘启龙

副主任:李 涛

成 员:(按姓氏笔画排序)

王 朋 付 凯 付 真 胡晓彤 蒋焱兰

# 序

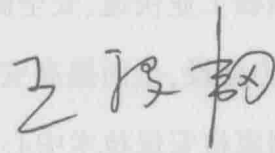
进入新世纪以来,国际社会所面临的核恐怖主义威胁及核扩散风险日趋严峻,为确保我国核工业快速、安全健康地发展,更好地应对上述威胁与风险,加强国家核安保能力建设,全面提高安保从业人员专业水平,显得十分必要和迫切。在此背景下,国家核安保技术中心组织力量编写了一套核安保专业培训教材,系统讲授核安保相关法律文书、管理体制、技术手段和相关技能等基本知识,旨在使核工业领域的核安保培训工作进一步系统化和规范化。这是一件基础性建设工作,在国家“十三五”规划开局之年推出,恰逢其时,具有重要意义。

我国一贯重视核安保工作。多年来,业已建立了国家核安保制度,形成了相关的工作体系,核安保能力建设取得了令人瞩目的成绩,并积累了许多实践经验。在国际合作方面,我国签署了包括《制止核恐怖主义行为国际公约》《核材料实物保护公约》及 2005 修订案在内的所有核安保相关国际法律文书,参加了核能发达国家倡领的全球核安保峰会以及国际原子能机构主导的各项核安保活动。所有这些成就与经验,为我国核安保能力的长远建设提供了指导,也为今天培训教材的编写打下了基础。

这套教材是我国正式出版的核安保专业领域的首套系列培训教学用丛书。其内容丰富、全面,既有核安保相关基本概念,又涵盖了核安保领域的技术进步成果和最新理念;反映了我国核材料、核设施以及运输活动安保的实际管理水平与实践经验,并涉及其他放射性物质及相关设施的相关内容;题材选择上也照顾

到核安保人才培养中各方面多层次的实际需要。期望在今后的使用过程中不断积累经验,充实我国核安保专业的发展成果和国际良好实践,使这套丛书开发得更系统、规范和适用,为我国核安保能力建设作出更大贡献。

编写出版这样一套几十册数百万字的大型丛书并非易事。我愿借此机会,向本套丛书的策划者、编写者以及其他参加者们表示诚挚祝贺,对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。



国家国防科技工业局副局长

国家原子能机构副主任

# 前 言

我国政府一贯高度重视核安保工作。自上世纪五十年代以来,我国制定了一系列法规标准,逐步形成了一套行之有效的管理体系,保持了良好的核安保记录。我国政府对核材料实施许可管理,建立了核材料衡算与控制制度。根据性质和数量,划分为不同类别,分别规定生产、储存、使用、运输等方面的实物保护要求。同时,我国对核设施实行等级保护和分区管理。根据重要程度和纵深防御原则,将核设施划分为控制区、保护区和要害区,分别配置了不同的技术防范手段,采取相应的保护措施。实物保护系统与核设施同时设计、同时建造、同时运行。

近年来,国内外恐怖主义活动呈现发展趋势,以核工业生产设施为袭击目标或以核技术与产品为主要工具、为实现一定政治目的而有意制造核恐怖,对人类社会安全构成了新的威胁。在当前我国核工业快速发展、国内反恐形势日趋复杂的新形势下,做好核安保工作尤为重要。核燃料循环体系的生产设施正是核设施中非常重要的一类,对核燃料循环方面知识的了解,成为核安保从业人员的迫切需求。

为适应新的安保形势,国防科技工业局组织编写了针对核安保从业人员培训的系列培训教材。其中《核燃料循环概论》是为核安保从业人员普及核燃料循环基础知识教材中的一本。

本书共分为六章。第一章介绍了核燃料循环概述,第二章介绍了铀资源获取(地质勘探和铀矿采冶),第三章介绍了核燃料加工(铀的纯化、转化、浓缩、核燃料元件制造),第四章介绍了核动力的生产,



第五章介绍了乏燃料后处理,第六章介绍了放射性废物处理处置。

本书由邹树梁、陈甲华和周精辟同志主笔撰写。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中疏漏与不妥之处在所难免,敬请有关专家和读者批评指正。

编者

2017年2月

# 目 录

第 1 章 核燃料循环概述 .....	1
1.1 核燃料循环 .....	1
1.2 世界核燃料循环发展历程 .....	4
1.3 国内核燃料循环发展历程 .....	13
第 2 章 铀资源获取 .....	17
2.1 地质勘探 .....	17
2.2 铀矿采冶 .....	19
第 3 章 核燃料加工 .....	34
3.1 铀的纯化 .....	34
3.2 铀的转化 .....	36
3.3 铀的浓缩 .....	46
3.4 元件制造 .....	49
第 4 章 核动力生产 .....	55
第 5 章 乏燃料后处理 .....	56
5.1 中间储存 .....	56
5.2 分离与回收 .....	61
5.3 核素嬗变 .....	84
第 6 章 放射性废物处理处置 .....	95
6.1 废物鉴别与分类 .....	95
6.2 放射性废气(气载废物)的处理 .....	101
6.3 放射性废液的处理 .....	103



# 第 1 章 核燃料循环概述

## 1.1 核燃料循环

核燃料循环(Nuclear fuel cycle)只对裂变核燃料而言,包括核燃料进入反应堆前的制备和在反应堆中的裂变及以后的处理、处置的整个过程。按核燃料性质可分为铀系燃料的 U-Pu 循环和钍系燃料的 Th-U 循环。因为 Th 燃料没有广泛应用,所以,现在通常所说的核燃料循环指的是 U-Pu 循环。U-Pu 循环中轻水堆(热中子堆)核电厂闭式 U-Pu 循环(见图 1.1)已经工业实现,快中子增殖堆核电厂闭式 U-Pu 循环尚未工业实现。

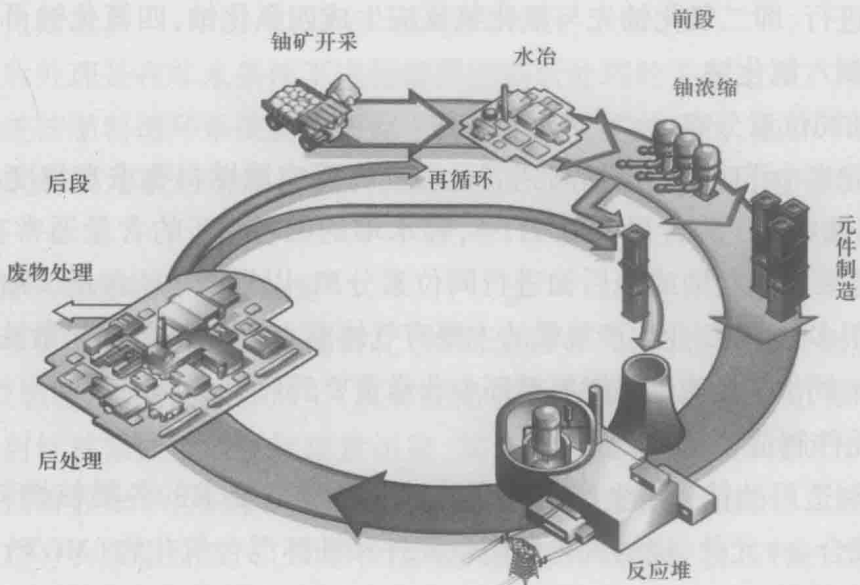


图 1.1 轻水堆核电厂闭式 U-Pu 核燃料循环示意图

由图 1.1 可见,核燃料循环以反应堆为中心,划分为堆前部分(前段)和堆后部分(后段)。核燃料循环前段即核燃料在反应堆使用前的工业过程包括:铀

(铀)矿开采、矿石加工冶炼、铀转化、铀同位素分离和燃料元件加工制造;核燃料循环后段,对闭式循环,指核燃料从反应堆卸出后的处理处置过程,包括:乏燃料储存、乏燃料后处理、放射性废物处理和最终处置过程。对一次通过式燃料循环,包括:乏燃料中间储存、直接(或经切割)包装、深底层最终处置。

### (1) 铀矿开采

把含有铀的矿石从地下开采出来,或通过地表钻孔将化学溶剂注入铀矿带,经化学溶浸,生产出液体铀化合物,再将浸出液提取出地表。这是 U-Pu 核燃料循环的第一个环节。

### (2) 前处理

核燃料前处理是指从铀矿中提取、纯化和精制铀的一系列化工生产过程,通常在水冶厂中进行。在铀水冶厂中,铀矿石经过粉碎和酸浸取(或碱浸取),其中的铀进入水溶液,矿渣作为废物处理。铀水冶厂的产品也被称为“黄饼”。用化学分离方法,如液-液萃取法将铀溶液中的杂质分离出去,达到所要求的核级纯度,并转化为易于氢氟化的铀氧化物。

### (3) 铀转化

为了易于进行铀同位素浓缩,需要将铀浓缩物转化为六氟化铀。铀转化一般分两步进行,即二氧化铀先与氟化氢反应生成四氟化铀,四氟化铀再与氟气反应最终得到六氟化铀。

### (4) 铀同位素分离

将铀元素中 $^{235}\text{U}$ 的含量提高到满足核动力反应堆燃料要求富集度(含量)的过程,天然铀中 $^{235}\text{U}$ 的含量为 0.711%,轻水堆的燃料 $^{235}\text{U}$ 的含量通常在 2.5%~5%,因此需要将天然铀或堆后铀进行同位素分离,以提高 $^{235}\text{U}$ 含量。铀同位素分离的方法很多,达到工业生产规模的主要有气体离心分离法、气体扩散法和激光分离法等。铀同位素分离是核燃料循环中非常重要的环节。

### (5) 元件制造

元件制造厂的任务是生产出符合核动力反应堆要求的各类核燃料元件,包括金属(或合金)元件、烧结氧化铀陶瓷元件和铀钚混合氧化物(MOX)陶瓷元件等。元件制造前,制造厂一般要先将浓缩的六氟化铀转化为高纯氧化铀粉末,再将其压成块状送入高温炉中烧结成密实的陶瓷燃料。六氟化铀转化为氧化铀有水法(如 AUC 法,即先将六氟化铀转化为三碳酸铀酰胺,再煅烧为氧化物)和干法(如流化床法、火焰法等)两种方法。如果需要的是金属元件,则用钙(镁)还

原法将六氟化铀转化为铀金属。

#### (6) 核动力生产

主要指民用核电厂的电力生产,目前几乎都在热中子反应堆中进行,其中压水反应堆应用最为广泛。来自元件制造厂的核燃料元件在堆中反应并释放出能量,消耗部分铀或钚,生成高放射性的裂片和超铀元素。核燃料元件在堆中达到预定的燃耗后,从反应堆中卸出,即为乏燃料。

#### (7) 乏燃料中间储存

乏燃料储存分湿式和干式两种。湿式是将乏燃料暂时储存在以水为屏障和冷却剂并衬有不锈钢覆面的池中。干式用空气冷却,通过储存使乏燃料冷却并使所含放射性核素衰变,减少低寿命放射性核素,降低放射性活度。

#### (8) 乏燃料后处理

乏燃料后处理工艺有干法和湿法两种。

湿法后处理是将经充分冷却和放射性核素衰变后,乏燃料元件在后处理厂解体、溶解,用化学的方法(常用溶剂萃取法)将铀、钚与裂片和其他锕系元素分离。铀、钚经过进一步纯化,作为后处理厂产品,多以氧化物形式储存或再经(铀)转化和浓缩后送到元件制造厂。裂变产物和超铀元素留于废液中,待分离处理和固化处置。

干法后处理是在非水条件下进行辐照燃料后处理的工艺过程。第四代反应堆及其先进核燃料循环系统正在研究干法后处理工艺的应用,铀钚不分离,进而将铀钚与次锕系元素用于制造燃料,减少放射性废物的量,同时有利于防止核扩散。

#### (9) 放射性废物处理和处置

在铀矿开采、选矿及水冶、铀转化、铀同位素分离、核燃料元件制造、核反应堆运行、核燃料后处理、铀钚加工、放射性化学操作以及其他操作过程中,均会产生含有放射性核素或被放射性核素污染,其浓度或放射性比活度大于审管部门确定的清洁解控水平,预期不再被利用的废弃物称为放射性废物。放射性废物按物理形态分为放射性废气、放射性废液和放射性固体废物三种。按放射性活度分为低放废物、中放废物和高放废物。

放射性废气经吸附延滞、过滤等净化措施去除或降低废气中的放射性成分,达到规定的标准后向大气排放。

含有裂变产物的中、低放射性废物用水泥或沥青固化后浅地层贮存,含长

寿命的裂变产物和超铀元素的高放废物经分离后,进行玻璃固化和深地层贮存。

如果来自反应堆的乏燃料不经后处理而直接进行处置,这样的核燃料应用过程被称为开式核燃料循环或一次通过式核燃料循环,如图 1.2 所示。

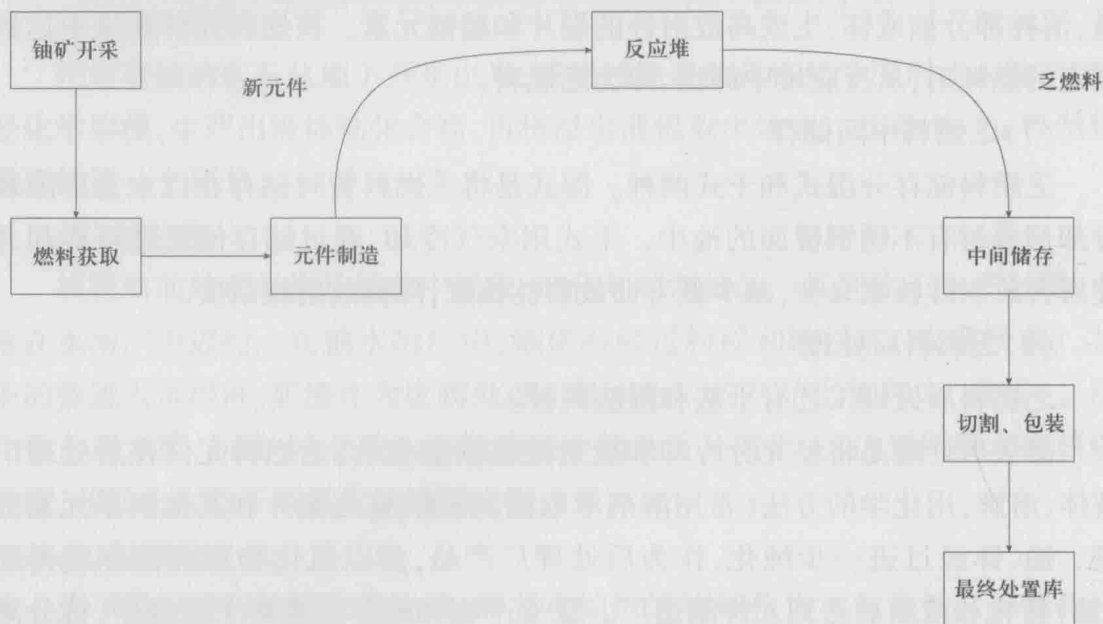


图 1.2 开式或一次通过式核燃料循环示意图

## 1.2 世界核燃料循环发展历程

### 1.2.1 世界核燃料循环国家分布

自从发现核反应可以产生巨大能量以来,核燃料循环工业就迅猛发展起来,核燃料循环工业是一个超长产业链的高端产业,涉及的技术领域广泛复杂,特别是后段燃料循环,不仅存在有极高毒性的钚和次锕系元素(Np、Am、Cm),还存在有强放射性的裂变产物,必须在密闭厚屏蔽的热室中远距离操作。因此在世界上真正拥有完整的核燃料循环工业体系的只有少数几个国家。

就核燃料循环前段技术而言,从事全部活动的国家有美国、俄罗斯、英国、法国、日本和中国,近年来,印度、巴基斯坦、伊朗也有强劲的发展势头(见表 1.1)。

表 1.1 世界上从事核燃料循环前段技术活动概况

前段技术名称		国家	生产技术内容
铀矿地质勘查与开发		美国、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、纳米比亚、尼日尔、中国、法国 <sup>①</sup> 、日本 <sup>①</sup>	寻找铀资源、建立铀矿山生产“黄饼”
铀转化生产技术		美国、英国、法国、加拿大、澳大利亚、印度、日本、巴基斯坦、南非、西班牙、俄罗斯、中国、巴西、南非	生产铀的氟化物、氧化物或金属铀
铀同位素分离		俄罗斯、美国、英国、德国、荷兰、日本、法国、中国、巴基斯坦、印度、比利时、西班牙、意大利、伊朗	采用气体扩散法、离心法生产浓缩铀
核燃料 元件制造	压水堆燃料元件	美国、法国、俄罗斯、日本、中国、韩国	生产压水堆第二代、第三代燃料元件
	沸水堆燃料元件		
	重水堆燃料元件	加拿大、韩国、印度、罗马尼亚、中国、巴基斯坦、阿根廷	生产 CANDU-6 燃料元件
	MOX 燃料元件	比利时、法国、印度、日本、英国、美国、俄罗斯	
沸水堆燃料元件		美国、法国、瑞典、德国、西班牙、日本	生产沸水堆核燃料元件

注：①目前主要是利用技术或资金在国外勘查与开发。

世界上采取“一次通过”技术路线，直接对乏燃料进行地质处置的国家有瑞典、加拿大、西班牙、美国；采取闭式循环技术路线的国家，除我国以外，还有法国、英国、俄罗斯、日本和印度（见表 1.2）。近年来，美国已决定今后对乏燃料进行后处理以便回收铀和钚，实现再循环利用。虽然世界上后段技术存在有“一次通过”和闭式循环两条不同的技术路线，但在核废物处置方面，特别是高放废物的处置方面，都把深地质处置作为现实可行的发展方向。

表 1.2 世界上核燃料循环技术路线国家分布概况

核燃料循环技术路线	国家	主要技术内容
“一次通过”	瑞典、加拿大、西班牙、美国 <sup>①</sup>	对乏燃料直接进行地质处置
闭式循环	法国、英国、俄罗斯、日本、印度、中国	回收乏燃料中的铀、钚，用于热堆或快堆燃料再循环

注：①虽然过去主张“一次通过”式技术路线，但目前已主张今后对乏燃料进行后处理以后回收铀和钚，实现再循环利用。



### 1.2.2 核燃料循环前段技术现状

铀资源勘查技术是随着铀的发现而发展的,开始也是采用传统的地质方法,或者简单地利用探测铀及其子体的放射性获得信息进行找矿。经过近百年来年的发展,已经形成了完整的勘查体系。与此同时,地质勘查技术,包括航空伽玛能谱测量和遥感技术、综合物化探技术、先进钻探技术、计算机技术、地理信息系统得到了有效的应用和扩展,进一步提高了找矿效果。

在最先开始阶段,铀矿的开采与传统的金属开采方法一样,采用坑道、竖井的地下开采方法,或采用剥离覆盖的露天开采等常规方法。开采的铀矿石采用搅拌浸出,并针对不同矿石特性进行酸浸或碱浸。之后奥林匹克坝等巨型多金属铀矿的发现,铀作为副产品得以开发;同时堆浸和原地爆破浸出也发展起来,美国、中亚等低品位、大矿量砂岩型铀矿地浸方法的成功开发,使铀矿开采技术迈入一个新阶段。利用生物特性的细菌浸出技术也逐渐发展起来,在生物菌种的选育和培养方面不断取得突破,与浸出技术有机结合,正逐步应用到铀资源开发的实际工作。当前,国际上铀矿开采总体发展趋势是数字铀矿山和循环经济,从而提高产量、工效和机械化程度,进一步降低了生产成本;水冶加工工艺的机械化和自动化工艺控制程度也得到较大提高。随着采冶技术的进步,天然铀的生产量稳中有升。

按照转化对象不同,铀转化分为天然铀转化、浓缩铀转化、堆后铀和贫铀转化三类。天然铀转化是将铀矿浓缩物加工成为  $UO_3$  或  $UO_2$ , 经过氢氟化转化成  $UF_4$ , 再经过氟化成  $UF_6$ , 供铀同位素分离厂做原料, 或者  $UF_4$  经过钙热还原得到金属铀。浓缩铀转化是将浓缩过的  $^{235}U$  的氟化物转化为铀氧化物和金属铀, 用于生产核电厂反应堆用的陶瓷级  $UO_2$ 。堆后铀转化是将堆后铀(后处理回收的铀)转化成  $UF_6$ , 以便铀的重新富集再利用, 以及贫铀转化。天然铀的转化过程在铀转化过程中占绝大部分, 因此, 一般意义上的铀转化就是指从铀矿浓缩物到氟化成  $UF_6$  的转化过程。世界上建有天然铀转化生产系统的国家有美国、英国、法国、加拿大、澳大利亚、印度、巴基斯坦、南非、西班牙、俄罗斯和中国。国外主要铀转化厂的  $UF_6$  生产工艺流程不尽相同, 以湿法转化工艺为主(见表 1.3)。铀同位素分离后生产核电厂反应堆用的陶瓷级  $UO_2$  的铀转化过程, 一般将其归入元件制造工艺。为了生产核电厂反应堆用的陶瓷级  $UO_2$ , 目前国际上采用五种铀转化工艺流程: 重铀酸铵转化流程(ADU); 三碳酸铀酰铵流程(AUC); 全干法