

法国核能概况与 核燃料循环后段

杨长利 主编

中国原子能出版社

法国核能概况与核燃料 循环后段

杨长利 主编



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

法国核能概况与核燃料循环后段 / 杨长利主编. —北京:中国原子能出版社,2017.11
ISBN 978-7-5022-8694-1

I. ①法… II. ①杨… III. ①核能工业-概况-法国 ②核燃料后处理-法国 IV. ①F456.562 ②TL24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 292627 号

内 容 简 介

本书介绍了法国核工业及核燃料循环后段发展的历史概况和现状。全书共两大部分,分 13 章。第一部分简要介绍法国核工业的形成及演变历程,体系结构与基本构成;第二部分全面介绍法国核燃料循环后段,特别是乏燃料后处理的演变历程、技术发展、工程实践、生产运行、组织管理、环境影响和经济性等方面的内容。

本书可供对法国核工业及后处理感兴趣的人员阅读,也可供从事核工业的领导及技术和管理人员等参考。

法国核能概况与核燃料循环后段

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 付 凯
装帧设计 马世玉
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 北京画中画印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 16.25
字 数 406 千字
版 次 2017 年 11 月第 2 版 2017 年 11 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-8694-1 定 价 98.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>
发行电话:010-68452845

E-mail:atomep123@126.com
版权所有 侵权必究

《法国核能概况与核燃料循环后段》

编 委 会

主 编 杨长利

副主编 薛维明 姚守忠 罗笑春 田宝柱

编 委(按姓氏笔画为序)

于 洁	王悦云	韦 萌	卢 涛
卢建荣	孙玉丕	孙春风	吴 琼
汪伦伍	张 琦	陆 燕	陈海成
信萍萍	徐培昇	陶海强	

序

当前,我国已商运核电机组 23 台,在建机组 26 台。2014 年国务院发布的“能源发展战略行动计划(2014—2020)”再次明确了我国核电发展目标:到 2020 年,核电装机容量 5 800 万千瓦,在建容量 3 000 万千瓦以上。核电在我国能源结构中已成为重要的组成部分,但是核电的规模化、可持续发展离不开铀资源供应保障与乏燃料和放射性废物长期安全管理。按照预测的核电发展规模,2020 年我国核电站乏燃料累积存量将超过 10 000 吨,核电站每年新产生的乏燃料约为 1 200 吨。至 2030 年,我国在运行和在建核电站的基础上,即使不考虑建设新的核电站,我国核电站乏燃料累积存量也将超过 25 000 吨,每年新产生的乏燃料约为 2 000 吨。发展乏燃料商业后处理能力,一方面能够实现核燃料的循环利用,提高铀资源利用率;另一方面可以实现乏燃料安全处理,保障核能发展走上可持续发展道路。而目前我国乏燃料后处理能力不能满足核能发展的要求,必须加快提升乏燃料商业后处理能力。

法国是世界上少数几个拥有完整核工业体系的国家之一,其核工业发展取得了世人瞩目的成就。法国也是坚持核燃料闭式循环战略、最积极发展后处理的国家。20 世纪七八十年代,法国核工业抓住核电快速发展的有利时机,通过阿格后处理厂的建造运营,在后处理领域取得了世界领先地位。中法核能合作已逾三十年,成果显著、成绩优异,当前正从核电合作向核燃料循环领域的全方位广泛合作进行拓展。后处理作为中法两国经贸合作与核能合作中重要的战略内容,已得到两国政府和领导人的高度重视。中法两国在后处理领域的合作,将高效构建我国核燃料循环产业链,为推动我国及世界后处理的发展起到积极的引领作用。

本书吸收了最新的中法交流成果,将法国核工业演变过程以及核燃料循环后段概况与后处理技术、设施等如实地呈现出来,希望能为关心我国核工业发展的各级领导、专家学者、相关从业人员等各界人士提供参考和借鉴,众人拾柴火焰高,希望大家共同努力推动我国后处理事业不断发展前进。

中国核工业集团公司董事长



2015 年 4 月 7 日

前 言

中法合作建设 800 吨/年大型商用核电站乏燃料后处理项目(以下简称 800 吨项目)是中法两国政府加强和平利用核能的重要合作项目。基于后处理技术的敏感性,该项目在两国的外交关系中具有十分重大的政治和经济意义,这也是继台山 EPR 核电之后最大的一个中法核能合作项目。对我国而言,通过引进 800 吨项目能够快速形成大规模的商业后处理能力,缓解核电站乏燃料安全管理的压力,促进核燃料后段产业技术水平的提升,实现我国核能发展三步走的第二部战略目标。因此,该项目的推进与实施,对巩固中法全面战略伙伴关系具有重要的纽带作用,也得到了中法两国两届政府和两任国家元首的高度重视。

在这样的背景下,与核工业相关的各个层面的领导、专家、学者和技术人员等都对了解法国核工业及后处理相关的内容表示出了积极的兴趣。通过大亚湾、岭澳和台山核电项目的合作,国内业内人士对法国核电相关领域有了较为充分的了解,但是对于法国核工业及后处理方面的发展缺乏系统性和总体性的认知,且该方面信息即使涉及也分散于众多媒介,为了给关心和支持我国核燃料循环后段及后处理发展的各位人士提供一个对法国核工业及后处理全面、系统的综合性认识 and 了解,在中核集团领导的要求下,本编写组通过编译、摘录和汇总各种相关的外中文献与资料,整理汇编成本书。

在本书的编写过程中,采纳了严叔衡、汪兆富、蒋云清、顾忠茂、范仲和叶国安等有关领导和专家诸多中肯和有益的意见或建议,谨向他们表示谢意。

由于编者水平有限,且本书涉及信息颇多,资料出处和时间也多有不同或差异,挂一漏万等不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

中核瑞能有限公司总经理 薛维明

2017 年 7 月

目 录

综述	1
----------	---

第一部分 法国核能概况

1 法国核工业发展简介	5
1.1 法国核工业历史	5
1.1.1 原子科学的探索期(1895—1945 年)	5
1.1.2 核计划的创立期(1945—1950 年)	5
1.1.3 军事核计划的部署期(1950—1996 年)	6
1.1.4 民用核计划的部署期(1958—1970 年)	6
1.1.5 核工业转型期(1970—1980 年)	7
1.1.6 核电标准化与技术改进期(1980—2000 年)	7
1.1.7 核工业重组和国际化推进期(2000 年至今)	8
1.2 法国核工业体系的组成单位	10
1.2.1 建设和运营商	10
1.2.2 与核相关的政府部门与机构	10
1.3 法国核电情况	11
1.3.1 法国能源结构中的核电	11
1.3.2 核电站分布	12
1.3.3 核电站事件	13
参考文献	14
2 原子能与可再生能源委员会(CEA)	15
2.1 组织机构	16
2.2 CEA 的历史	17
2.2.1 1945—1949 年:诞生与起步	17
2.2.2 1950—1958 年:核工业发展起步阶段	18
2.2.3 1958—1970 年:核计划部署	19
2.2.4 1970 年至今	21
2.3 CEA 研究中心	23
2.3.1 民用研究中心	23
2.3.2 军事研究中心	24

参考文献	24
3 阿海珐集团(AREVA)	26
3.1 集团概况	26
3.2 管理模式	28
3.2.1 监事会	29
3.2.2 董事会委员会	29
3.2.3 董事会	29
3.3 历史沿革	29
3.3.1 AREVA NP(原 Framatome ANP 公司)	29
3.3.2 AREVA NC(原高杰马公司)	30
3.3.3 AREVA TA(原 Technicatome 公司)	30
3.3.4 AREVA 集团	31
3.3.5 AREVA 集团重组	31
3.4 业务	32
3.4.1 铀矿事业部	32
3.4.2 前段事业部	33
3.4.3 反应堆与服务事业部	33
3.4.4 后段事业部	34
3.4.5 可再生能源业务部	38
3.5 国际业务	38
3.5.1 美国	38
3.5.2 中国	38
3.5.3 非洲	40
参考文献	41
4 法国核安全	42
4.1 核安全管理体系与机构	42
4.2 核安全法律体系	44
4.2.1 主要法律	44
4.2.2 基础核设施建造的核安全规则	45
4.2.3 核安全管理体系的优点	49
4.3 核安全技术发展	49
4.3.1 核燃料循环后段设施的安全方法	49
4.3.2 后处理核安全评价方法	50
4.3.3 法国后处理厂安全设计的主要步骤	53
参考文献	53
5 法国核保障监督	55

5.1 关于核不扩散及国际核保障的义务	55
5.1.1 核不扩散条约(NPT)和核供应国集团(NSG)	55
5.1.2 核保障监督的目的及技术手段	55
5.1.3 多边和双边协议与核保障义务	56
5.1.4 法国/EURATOM/IAEA 核保障协议(INFCIRC290)及其实施	57
5.2 核保障组织体系	57
5.2.1 法律方面	57
5.2.2 核保障当局	58
5.2.3 核保障信息管道	58
5.3 核保障技术	59
参考文献	59
6 公共宣传	61
6.1 基本情况	61
6.2 社会与公众的态度	62
6.3 政府、独立审管部门的态度	63
6.3.1 核安全局	63
6.3.2 辐射防护与核安全研究所(IRSIN)	64
6.4 法国电力(EDF)的公共宣传	64
6.4.1 广告效应	64
6.4.2 公众投票	65
6.4.3 参与国内和国际会议	65
6.4.4 新闻发布会	65
6.4.5 多方沟通	65
6.4.6 其他	65
6.5 阿海珐的公共宣传	66
6.5.1 企业和业务的推广	66
6.5.2 宣传策略	66
6.5.3 与各团体的对话	69
6.5.4 透明与反应性:定期通报	71
6.5.5 当地融入	71
6.6 反核运动	72
参考文献	72

第二部分 法国核燃料循环后段全貌

7 核燃料循环后段概况	75
-------------	----

7.1	核燃料闭式循环的短期目标与战略目标	75
7.1.1	短期目标:热堆核燃料循环	75
7.1.2	长期战略目标:快堆燃料循环	77
7.2	核燃料闭式循环概况	77
7.2.1	核燃料循环前段及燃料组件在反应堆内辐照	78
7.2.2	乏燃料	80
7.3	后处理与再循环情况	81
7.4	放射性废物管理现状	83
	参考文献	84
8	法国放射性物质运输	85
8.1	概述	85
8.2	乏燃料容器	86
8.2.1	放射性物质货包分类	86
8.2.2	乏燃料运输容器	87
8.3	运输方式	89
8.3.1	运输方式	89
8.3.2	法国乏燃料运输方式及路线	91
8.4	运输安全监管	92
8.4.1	监管组织	92
8.4.2	法规体系	93
8.5	运输安全	93
8.5.1	容器的可靠性	93
8.5.2	运输实施可靠性	93
8.5.3	事件或事故处理	93
	参考文献	94
9	法国后处理技术发展	95
9.1	UP1	95
9.1.1	UP1 厂天然金属铀处理工艺	96
9.1.2	UP1 厂处理铀-铝和铀-铝合金组件工艺	97
9.1.3	UP1 厂的退役工作	97
9.2	UP2 和 UP2-400	98
9.2.1	早期 UP2 后处理厂	98
9.2.2	UP2-400	98
9.3	UP3 和 UP2-800	100
9.3.1	乏燃料接收与贮存	100
9.3.2	首端	105

9.3.3 化学分离	109
9.3.4 尾端	111
9.3.5 控制系统	111
9.3.6 材料与设备	112
9.3.7 机械维修	114
9.4 UP2-800 的技术改进	114
9.4.1 R7 玻璃固化设施的改进	115
9.4.2 R4 车间	116
9.5 高燃耗燃料组件和 MOX 燃料组件的后处理	117
参考文献	117
10 法国后处理设施情况	119
10.1 封特耐欧罗兹研究中心	119
10.2 马库尔基地	119
10.2.1 马库尔基地概况	119
10.2.2 UP1 后处理厂	120
10.2.3 马库尔基地其他核设施	120
10.3 阿格中心	121
10.3.1 阿格中心厂址概况	121
10.3.2 UP3 和 UP2-800	124
10.3.3 UP3 和 UP2-800 的乏燃料贮存	126
10.3.4 UP3 和 UP2-800 厂技术的差异性	126
10.3.5 阿格中心的建造模式	126
10.3.6 阿格中心的组织管理	129
10.4 阿格中心流出物的排放与监测	130
10.4.1 气态排放	130
10.4.2 液态排放	131
10.4.3 阿格后处理厂的环境影响	133
10.4.4 放射性影响	139
10.4.5 流行病学研究	140
参考文献	141
11 钚在快堆与轻水堆中再循环	142
11.1 快中子增殖反应堆	142
11.1.1 快中子增殖反应堆概述	142
11.1.2 法国快堆发展概况	143
11.2 混合氧化物(MOX)燃料	149
11.2.1 混合氧化物(MOX)燃料发展概述	149

11.2.2	法国 MOX 燃料制造及应用	150
11.2.3	MOX 在压水堆中的技术特性	152
11.2.4	快堆 MOX 燃料制造的经验 and 未来的发展趋势	153
	参考文献	155
12	放射性废物管理	157
12.1	放射性废物的分类	157
12.1.1	放射性废物分类的目的和原则	157
12.1.2	分类方法	157
12.1.3	法国放射性废物的分类及其管理现状	160
12.1.4	后处理厂放射性废物的分类	161
12.1.5	后处理厂放射性废物的主要来源	161
12.2	放射性废气处理	163
12.2.1	引言	163
12.2.2	废气处理技术	164
12.2.3	后处理厂气体净化系统	169
12.3	低中放废液处理	171
12.3.1	低中放废液处理主要方式	171
12.3.2	低中放废液处理	172
12.4	高放废液处理	176
12.4.1	引言	176
12.4.2	高放废液玻璃固化	178
12.5	有机废液处理	187
12.5.1	引言	187
12.5.2	法国有机废液的处理	188
12.6	含氟废水处理	189
12.6.1	氟的产生与分布	189
12.6.2	法国后处理厂含氟废液的处理与排放	189
12.7	放射性固体废物处理	192
12.7.1	引言	192
12.7.2	法国固体废物处理	192
12.8	极低放废物处理	196
12.8.1	法国极低放废物的来源	196
12.8.2	极低放废物处置设施	196
12.9	放射性废物的处置	197
	参考文献	200
13	法国核燃料循环后段及后处理厂的经济性分析	202

13.1 法国核燃料循环后段的成本及收益·····	202
13.1.1 法国核燃料循环后段的成本·····	202
13.1.2 核燃料循环后段的收益·····	203
13.1.3 结语·····	206
13.2 法国后处理厂的经济性分析·····	206
13.2.1 法国后处理厂的费用构成·····	206
13.2.2 法国后处理厂建设资金来源·····	208
13.2.3 法国后处理厂对外签订的合同情况·····	209
13.3 结论·····	212
参考文献·····	212
14 结束语 ·····	213
14.1 2020—2030 年发展规划·····	214
14.2 2035—2040 年以及之后的发展规划·····	214
附录 1 法国核设施安全方法学 ·····	216
一、综述·····	216
二、辐射防护·····	219
三、核临界安全·····	223
附录 2 阿格后处理厂和梅洛克斯厂的核保障 ·····	229
一、阿格后处理厂和梅洛克斯厂核保障的基本原则·····	229
二、阿格后处理厂的核保障·····	230
三、梅洛克斯设施的核保障·····	235
附录 3 法国核电一览表 ·····	239
大事记 ·····	241
缩略语 ·····	243

综 述

当前,安全高效发展核电已经是我国改善能源结构,提高清洁能源供应的有效措施。截至 2017 年 9 月,我国已运行核电机组 37 台,总装机容量达到 33 657 MW;在建机组 20 台,装机容量 22 006 MW。我国已基本具备百万千瓦级压水堆核电站自主设计和工程建设能力。根据核电发展规划,到 2020 年我国的核电装机容量将达到 5 800(运行)+3 000(在建)万千瓦核电发展规模将超过法国而跃升全球第二位。2020 年以后,随着经济发展对能源需求增长,核能应用规模将会在较长的时间内继续增大,为我国国民经济增长发挥更大的作用。

按照我国核能科学发展“压水堆—快堆—聚变堆”的三步走战略以及坚持核燃料闭式循环技术的路线,发展压水堆型核电站只是我国核能发展的第一步。当压水堆型核电站发展到一定规模以后,铀资源供应不足的矛盾将愈发突出,同时,核电站乏燃料长期安全管理风险将提高,而解决矛盾的科学途径就是要发展“快堆”及实现“快堆燃料循环”,以期将压水堆乏燃料的铀资源利用率由不足 1%提升数十倍,并可实现乏燃料中高放射性废物管理的固有安全以及大大缩短安全监管期限。

核燃料循环一般以核反应堆为界,分为以下三个主要阶段:

1. “前段”,制成燃料元件供反应堆使用之前的一系列工业活动;
2. “核反应堆”,核燃料发生核裂变反应以利用核能和/或生产新核燃料的设施,通常还附设新燃料储存和乏燃料暂时储存;
3. “后段”,燃料元件从反应堆卸出后的一系列工业活动,包括乏燃料暂时储存、乏燃料后处理、放射性废物处理与处置以及主要物料在上述各环节之间的运输。

核燃料循环有两种方案:第一种是以后处理为代表的闭式循环方案,即对反应堆中卸出的乏燃料进行后处理,并将铀和剩余的铀与裂变过程中产生的废物分离;第二种为开式循环,又称“一次通过”,即直接处置方案,乏燃料先经过常规的长期贮存,然后进行一定的整备后再加以处置。

闭式循环方案是以法国为代表(其他有日本、俄罗斯、印度、英国)选择的核能发展战略。美国虽然由于坚持核不扩散等政治原因停止了商业后处理活动并限制韩国、中国台湾等发展后处理技术,但是,美国仍然保持很高的后处理技术研究水平、发展能力和随时实现工业化的实力,目前只是采取乏燃料暂存的“观望”态度。

法国由于其国土上几乎没有石化能源资源,在 20 世纪 70 年代,就确立了积极发展核能、坚定不移地实施核燃料闭式循环的政策。如今,在运的 58 座核电站为国家提供 85% 的电力,而其电价在欧洲最低;正在运行的 UP3 和 UP2-800 乏燃料后处理厂,不仅使本国的乏燃料得到处理,还处理了德国、日本、比利时等国家的乏燃料;不仅将全国的核电站乏燃料

集中贮存并回收再利用其中的核材料,将大量裂变产物包容入玻璃固化体中,实现了高放废物长期贮存固有安全的目标。法国多年来的后处理产业业务成绩突出;德、日、比利时等委托法国处理乏燃料也是各得所需,获得了双赢的结果。法国积累了丰富的快堆运行经验,商业化(凤凰和超凤凰堆)进程只是由于 1984 年的切尔诺贝利核事故而搁浅。

法国成功的商业核燃料闭式循环工业实践表明,乏燃料后处理产业,技术是成熟的,设施是安全的,经济上是完全可以接受的。我们应该很好地借鉴法国的经验,发展我国的后处理产业。



第一部分

法国核能概况



