

中国核燃料循环后段

杨长利 主编

中国原子能出版社

中国核燃料循环后段

杨长利 主编



中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核燃料循环后段 / 杨长利主编. —北京 :

中国原子能出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5022-7617-1

I. ①中… II. ①杨… III. ①核燃料后处理-概况-中国

IV. ①TL24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 260613 号

中国核燃料循环后段

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 胡晓彤

装帧设计 马世玉

责任校对 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 880 mm×1230 mm 1/16

印张 14.25

字数 356 千字

版次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5022-7617-1 定 价 99.00 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

《中国核燃料循环后段》 编委会

主 编：杨长利

副主编：薛维明 姚守忠 吴春喜 罗笑春
尤永春 田宝柱

编 委：（按姓氏笔画为序）

王悦云	韦 萌	卢建荣	卢 涛
陈亚君	陈思喆	陈海成	李宏业
李言瑞	陆 燕	汪伦伍	张 雪
张 琦	张湘龙	信萍萍	宫海瑞
徐培昇	彭佳苗		

序

随着以核电为龙头的核工业再次成为国家经济发展的焦点，核电作为国家工业结构和能源保障的供给侧调整重要内容之一，也得到了党和国家的高度重视。当前，我国已商运核电机组 33 台，在建机组 20 台。今年发布的“十三五”规划再次明确了我国核电发展目标：到 2020 年，核电运行装机容量达 5 800 万千瓦，在建容量到 3 000 万千瓦以上。在这样的形势下，核燃料供应保障与乏燃料安全管理成为核电规模化安全发展的两大约束条件，这也再次证明我国 20 世纪 80 年代提出核燃料闭式循环路线是一项高瞻远瞩的科学决策。作为核燃料闭式循环中关键一环的核循环产业，也伴随着核电发展得到了相应的发展，中国正在从“核大国”走向“核强国”。

随着核能和平利用的不断扩大，我国在动力堆乏燃料后处理技术研发与核循环产业的布局方面也逐步加大了投入力度。“十三五”规划中亦提出：加快论证并推动大型商用后处理厂建设；加强核燃料保障体系建设等内容。2010 年动力堆乏燃料后处理中试厂热试成功，标志着我国掌握了核心工艺技术；2014 年中国原子能科学研究院建成“核燃料后处理放化实验设施”，标志着我国的后处理研发能力迈向了先进水平；2015 年自主示范工程开工建设；2016 年中法合作核循环项目谈判接近尾声。我国的后处理技术与核循环产业已经迎来了蓬勃发展的新阶段。

通过“以我为主、中外合作”，我国已经实现了核电技术的跨越式创新发展，核电已成为“一带一路”及“走出去”战略的两大

国家名片之一。我们相信我国核循环产业可以一方面通过自主建设掌握核心技术；另一方面通过引进学习提升技术水平，将能保证在2030年前后建成与核电发展规模基本相适应的核循环能力，亦能为2035年全面实现核能三步走中第二步（商业快堆）的战略目标奠定基础。

本书旨在系统地描述我国核电站乏燃料后处理的发展历程、现状和未来方向，介绍我国核燃料循环后段概况与后处理技术、设施等情况，希望对有兴趣了解和有志于从事核电站乏燃料后处理事业的人士有所裨益。回顾历史是为了不忘我们勇往直前的初心，展望未来是为了不忘我们勇于担当的责任，把握机遇、迎接挑战是我们创新发展的实践。

祝愿我国的核循环事业走向辉煌。

中国核工业集团公司董事长



2016年12月

前 言

核能作为清洁能源已成为世界能源构成的重要组成部分。截至2016年7月，世界上运行的核电机组已有447台，核发电量达到3.89亿千瓦。据世界核协会（WNA）的统计，截至2015年年底世界各国在建核电机组66台，计划建设核电机组158台。因此，即使是在日本福岛事故之后，核电依然是世界各国能源供应的重要解决方案。同时，核电站乏燃料后处理作为核能可持续发展的重要保证，其技术发展和产业建设被各核能大国所重视。

我国是世界最大的发展中国家，随着国民经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高，能源需求、能源储备、能源结构和能源安全的问题日渐凸显。核能的作用和地位正在不断得到重视和提高，安全高效发展核电已成为我国优化能源结构、提高清洁能源供应、推动节能减排、应对气候变化、建设环境友好社会的有效措施。而核电规模的扩大为乏燃料后处理产业的发展提供了有利的条件，也提出了紧迫的要求。发展乏燃料后处理作为国家核能发展的战略要求，不仅可以为第四代核电（快堆）提供燃料，解决天然铀不足的问题，并实现核电站乏燃料长期安全管理，还可以为巩固我国核威慑力量做出贡献。

乏燃料后处理作为核燃料闭式循环的关键环节，需要尽快形成产业化能力，以适应和满足核能科学、可持续发展的要求。目前我国乏燃料后处理产业仍有众多问题急需研究，包括科研体系、法规标准适用、信息化和产业化建设等。因此，中核集团公司作为国家指定的乏燃料后处理专营企业，应以增强乏燃料后处理技术自主创

新能力、不断完善核燃料闭式循环产业链协作配套体系为目标，做好乏燃料后处理众多方面的深入研究，为政府规划决策提供科学依据，推动以乏燃料后处理和快堆为重要支撑的第四代核电技术的有序发展。

本书回顾了我国核工业和乏燃料后处理的发展历程，对我国乏燃料后处理为主要技术环节和核安全进行了描述，分析了乏燃料后处理的经济性，并提出了对我国乏燃料后处理产业发展的设想。读者可通过本书大致了解我国核电站乏燃料后处理的全貌。

在本书的编写过程中，编写组得到了各方有关方面的领导和专家的指导与帮助，在此谨表示衷心的感谢。由于编者水平有限、经验不足，难免有失妥之处，欢迎读者批评指正。

中核瑞能科技有限公司总经理 薛维明

2016年8月

目 录

1 我国核工业发展概况	1
1.1 从我国能源需求看核工业发展	1
1.2 我国核工业发展历程及现状	4
2 乏燃料后处理概况	14
2.1 世界乏燃料管理简况	15
2.2 我国后处理事业历史沿革	17
2.2.1 后处理工艺技术研究发展历程	17
2.2.2 生产堆乏燃料后处理中间试验厂建设	22
2.2.3 生产堆乏燃料后处理生产厂建设	23
2.2.4 我国后处理事业的整体现状	24
2.3 我国发展后处理产业的重大意义	27
2.3.1 后处理是保障国家核威慑的战略需要	27
2.3.2 后处理是核能可持续发展的必要保证	27
2.3.3 后处理是优化废物管理的有效途径	28
2.4 后处理产业基础力量	29
3 乏燃料运输与离堆贮存	34
3.1 乏燃料运输	34
3.1.1 运输容器	36
3.1.2 运输实践	44
3.1.3 需求分析及发展方向	51
3.2 乏燃料离堆贮存	56
3.2.1 湿法贮存	56
3.2.2 干法贮存	61
3.2.3 干法与湿法贮存的对比	69
4 我国后处理技术发展	74
4.1 后处理工艺技术研发	74

4.1.1	先进水法后处理技术研究	74
4.1.2	干法后处理技术研究	76
4.2	放化大楼	77
4.2.1	概况	77
4.2.2	研究成果	81
4.3	动力堆元件后处理中间试验工厂	82
4.3.1	中试厂概况	83
4.3.2	工艺流程	83
4.3.3	突破与成果	94
4.4	商用后处理厂	95
4.4.1	背景	96
4.4.2	中法合作核循环项目	96
4.4.3	具备的条件	101
5	后处理回收铀钚资源的利用	104
5.1	后处理铀的应用	105
5.1.1	等效天然铀	106
5.1.2	先进燃料重水堆	109
5.2	回收钚的应用研究	111
5.2.1	国外 MOX 燃料的发展	111
5.2.2	我国 MOX 燃料的发展	115
5.2.3	我国快堆开发	117
6	放射性废物管理	121
6.1	放射性废物的分类	121
6.2	废物最小化原则	122
6.3	后处理厂废物的一般特性	123
6.4	气载放射性废物的处理	124
6.5	中、低放射性废液的处理	124
6.6	高放废液的处理	128
6.7	有机废液的处理	132
6.8	放射性固体废物的处理	134
6.9	放射性废物的最终处置	136
7	乏燃料后处理的核安全	142
7.1	后处理核安全监管体系和制度	142

7.1.1	行业主管部门及职责	143
7.1.2	核安全监管部门及职责	146
7.1.3	核安全许可证制度	149
7.1.4	核安全监督	151
7.2	后处理核安全法律体系	152
7.2.1	立法机构	152
7.2.2	主要法律	153
7.3	后处理核安全评价技术与实践	156
7.3.1	后处理核安全评价技术	156
7.3.2	中试厂核安全实践	158
8	核燃料循环后段的经济性分析	163
8.1	核燃料循环后段的成本	163
8.1.1	乏燃料运输成本	163
8.1.2	乏燃料中间贮存成本	164
8.1.3	乏燃料后处理成本	165
8.2	核燃料循环后段的收益	168
8.2.1	钚值估算	168
8.2.2	铀值估算	170
8.3	乏燃料处理处置基金	171
8.3.1	乏燃料基金管理现状	172
8.3.2	乏燃料基金征收及使用情况	176
8.4	核燃料循环后段经济性的影响因素	178
8.4.1	时间成本	178
8.4.2	贷款利率及汇率	181
9	我国后处理产业发展设想	185
9.1	产业发展指导思想和总体思路	186
9.1.1	指导思想	186
9.1.2	总体思路与发展目标	186
9.2	后处理技术发展目标	187
9.3	后处理重点项目	188
9.3.1	中法合作核循环项目	189
9.3.2	自主设计商用后处理厂项目	190

10 结束语	192
附录 1 中试厂安全审评依据	197
附录 2 中试厂安全审评要素及关注点	204
大事记	213

1 我国核工业发展概况

1.1 从我国能源需求看核工业发展

纵观当今世界，人类在享受经济增长、科技进步、社会发展所带来的巨大成果的同时，也逐渐清晰地认识到由于过度使用和依赖化石能源所带来的危机。面临日趋严峻的能源安全问题、气候变化以及生态环境挑战，迫使我们重新思考如何利用能源这一话题。

我国是世界上人口最多的国家，也是世界上第一大能源生产国和消费国。特别是进入 21 世纪后，能源消费增长迅速，消费总量从 2000 年不足 14 亿吨标准煤，增长到 2015 年的 43 亿吨标准煤，虽然近年来增长率有所下降，但按照这种趋势，未来我国能源消费量将超过社会的承载能力。另外，2011—2035 年中国能源需求的增长速度为 2.23%，高于国际能源署（IEA）新政策情景下的 1.9%；同期能源生产的增长速度为 1.97%，也高于 IEA 的 1.4%。2035 年中国能源需求将占世界能源需求的 24%，而中国的能源需求增量将占世界能源需求增量的 38.5%。

然而我国化石能源相对不足，截至 2014 年年底，石油探明可采储量只占世界的 1.1%，天然气占 1.8%，煤炭占世界探明储量的 12.8% 左右，“多煤、少气、缺油”的资源条件，决定了中国能源结构是以煤为主。随着我国经济几十年的高速发展，煤炭储量快速消耗，且在其开采、运输、使用过程中逐渐暴露出严重的社会、安全、环境和气候问题，不符合当前国际上能源多元化、低碳化的发展趋势。

当今世界，能源格局正在深刻调整，新一轮能源革命已经开始。在新能源技术、信息技术和全球碳减排压力的推动下，未来世界的主体能源应当是绿色低碳的，生产消费模式应当是高度智能化的，天然气和非化石能源将可能成为未来的主体能源。

2015年,《中美元首气候变化联合声明》重申了2014年两国政府签署的《气候变化联合声明》中的约定。我国政府承诺,到2030年后,在我国境内将不再增加二氧化碳排放。我国政府高度重视并致力于推动能源转型变革。2014年6月,国家主席习近平亲自主持会议,专门研究能源发展问题,明确提出推动能源生产消费革命是中国能源发展的基本国策,其基本内容可以概括为“四个革命、一个合作”,即:推动能源消费革命、供给革命、技术革命和体制革命,全方位加强国际合作。根据习近平主席这一战略思想,中国政府发布了《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》,确立了“节约、清洁、安全”的战略方针和“节约优先、立足国内、绿色低碳、创新驱动”的发展战略。

中国确立的能源绿色低碳发展目标是:到2020年,非化石能源占一次能源消费总量的比重达到15%左右,单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005年下降40%~45%;到2030年,非化石能源占一次能源消费总量的比重达到20%左右,单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005年下降60%~65%;2030年前后碳排放达到峰值,并力争尽早达到峰值。

中国工程院曾组织对各种发电能源链的温室气体排放进行了研究,把温室气体归一为二氧化碳(当量),见表1-1。从中可以看出,不同的发电能源链排放的二氧化碳量不同,对环境造成的影响也各不相同。其中:核电、水电的减排效应最好,其排放当量只是煤电链的1%左右,其次是风电链,再次为太阳能发电链。

表 1-1 几种发电能源链排放的二氧化碳当量

能源类别	温室气体归一化排放量	备注
煤电链	1 072.4 g/(kW·h)	含煤炭生产、运输及电厂建造、运行等环节
核电链	11.9 g·CO ₂ /kWh	含燃料循环前后段及电厂建造、运行等排放
水电链	0.81~12.8 g·CO ₂ /kWh	含设备制造、电厂建设、运行、维护等排放
风电链	15.9~18.6 g·CO ₂ /kWh	含社保制造、配套建设、运行、维护等排放
太阳能发电链	56.3~89.9 g·CO ₂ /kWh	含光伏电池生产、配套建设、运行、维护等排放

2015年,全国用电量55 500亿千瓦时,同比增长0.5%,增速同比回落3.3个百分点。2015年全国发电量56 045亿千瓦时,比上年增长0.6%。其中,水电发电量11 143亿千瓦时,同比增长5.1%,占全国发电量的19.9%;

火电发电量 40 972 亿千瓦时，同比下降 2.3%，占全国发电量的 73.1%；核电、并网风电和并网太阳能发电量分别为 1 695 亿千瓦时、1 851 亿千瓦时和 383 亿千瓦时，同比分别增长 27.2%、15.8% 和 64.4%，占全国发电量的比重分别比上年提高 0.6 个、0.4 个和 0.3 个百分点。

截至 2015 年年底，全国发电装机容量达到 150 673 万千瓦，同比增长 10.4%，其中非化石能源发电容量 51 642 万千瓦，占总装机容量 34.3%。2015 年核电投产规模创年度新高，发电量高速增长。全年净增核电机组 724 万千瓦，年底核电装机容量 2 717 万千瓦。电源结构继续优化，绿色比例上升。

国家能源发展“十三五”规划的战略导向主要集中在能源消费总量控制、煤炭清洁高效利用、大力发展清洁能源、能源体制改革上。面对我国能源发展中出现的两大矛盾——供需逆向分布（用电负荷中心和能源产能中心呈明显逆向分布）、能源（煤炭资源）与水逆向分布，“十三五”能源发展规划的总体思路是对能源布局进行优化，生产布局采用“五基两带”，即东北、山西、鄂尔多斯、西南、新疆五大能源基地，核电及海上两个能源开发带。

相对于其他清洁能源，核电有着不可比拟的优势：核电电力供应稳定，年运行时间长，不受气候影响，适合承担基础用电的供应。核电的主要原料为铀，用量少，运输成本较煤炭低很多，可大大节省交通运输资源，因此对于煤炭资源缺乏的东部地区来说，发展核电的益处更加明显。在发电成本上，核电将越来越占优势。在未来的几十年内，核电将成为唯一最有可能大规模替代煤炭的清洁能源。

2011 年日本福岛核事故发生后，引起世界范围内对核电安全性的担忧。有关国家纷纷对本国核电安全性重新进行了评估。通过检查评估，世界主要核电国家采取了措施并保持继续发展核电的立场。在我国，国家核安全局、能源局和地震局联合对国内运行和在建核电厂展开了安全大检查。其评估结果显示，我国核电技术发展具有后发优势。我国已形成的安全监管体制、已获得的监管实践和已建立的较高水平的运营管理能力，共同保证了我国核电安全运营绩效在世界同行中居于前列。

在此背景下，国家编制了《核电安全规划（2011—2020 年）》和《核电中长期发展规划（2011—2020 年）》，彰显了国家对于发展清洁能源的决心，以及核电对于中国节能减排的重要意义。根据核电发展规划，到 2020 年我国

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。

综上，我国经济社会发展对能源的需求持续增长，面临国内资源环境制约日趋强化和应对全球气候变化减缓 CO₂ 排放的双重挑战。核能对我国突破资源环境的瓶颈性制约、保障能源安全、减缓 CO₂ 排放、实现绿色低碳发展具有不可替代的作用，是我国未来可持续能源体系中的重要支柱，我国核工业也将迎来难得的发展机遇。

1.2 我国核工业发展历程及现状

对于中国核工业来说，1月15日是一个“大日子”。1955年的这一天，党中央审时度势、高瞻远瞩，作出了创建核工业的战略决策，中国核工业就此发轫。

60多年来，在几代中央领导集体的亲切关怀和正确领导下，在全国人民的大力支持下，我国核工业在探索中前行、在砥砺中成长、在发展中壮大，逐步形成了独立完整的核工业体系，掌握了一大批具有自主知识产权的核心技术，打造了一支技术精湛、作风优良的人才队伍，为维护国家安全、促进经济社会发展、提振民族自信心和自豪感做出了重要贡献。

（1）核工业创建决策，体制体系确立（1955.1—1958.2）

在我国核工业诞生前，有两个重大事件。一是1950年5月，中国科学院成立近代物理研究所（即现在的中国原子能科学研究院前身）；二是1954年10月，广西发现铀矿石。这两件事是中央决策创建我国核工业的前奏和前提。

两件事情促使毛泽东做出发展中国核工业的决定：一是在朝鲜战争期间，美国总统艾森豪威尔曾表示要使用原子武器。当时，原子弹已运抵日本冲绳美军基地，美国远程轰炸机可随时对中国和朝鲜发动核打击；另一件事是1951年6月，法国核科学家约里奥·居里夫人的中国学生杨承宗先生从法国回国，他替约里奥·居里给毛泽东捎了一口信。约里奥·居里说，你回去转告毛泽东，你们要保卫世界和平，要反对原子弹，你们必须拥有自己的原子弹。

在这样的背景下，1955年1月15日，毛泽东主持召开了中央书记处扩大会议，做出了建立和发展我国原子能事业的战略决策。中国发展原子能建立

核工业的历史从此开始。

会议后不久，1955年4月20日，中苏签订和平利用原子能协议，帮助中国建立一堆一器（即反应堆和加速器）。

从1955年1月到1958年3月，这三年时间里，主要解决组织领导体制、原子能工业和科研体系，制定了我国核工业建设的蓝图。为此，中央指定陈云、聂荣臻、薄一波组成三人小组，负责指导原子能事业的发展，具体业务由国务院三办负责。1955年12月，在薄一波主持下，起草修订了《关于一九五六年至一九六七年发展原子能事业计划大纲》（简称《大纲》），《大纲》是核工业发展最早的蓝图，提出了创建我国核工业的设想，确定了我国将以最近代的科学技术，发展国民经济，巩固国防。与此同时，积极争取苏联的援助，合作的内容和范围逐步扩大。随着中苏合作的进展，相应机构应运而生：

1955年1月，中苏签订了普查勘探铀矿协定；4月，国务院三办成立铀矿地质局；

1955年4月，中苏签订了发展原子核物理研究协定；7月，国务院三办成立建筑技术局；

1956年8月，中苏签订了原子能工业协定；11月，国务院成立三机部；

1957年10月，中苏签订了国防新技术协定；

1958年2月，国务院决定将三机部改为二机部。

经过三年的筹划，组织领导体制由中央三人小组、国务院三办事业局确定为国家工业部体制。中苏签订四大协定，解决了铀资源勘探、核科学研究、核燃料生产、核武器研制四大体系的建设，规划了整个核工业建设与发展的蓝图，即由中央直接领导、国家工业部统一组织，建立一个独立的、完整的核工业体系。

在规划体制、体系的同时，中央着手组建一支精兵强将的核工业队伍。当时采取了三大措施：一是1955年中央决定成立由刘杰、钱三强、蒋南翔（时任清华大学校长）、江隆基（时任北京大学校长）等8人组成的原子能干部培养工作领导小组。1955—1958年，从高等院校相近专业中，先后选调几百名高年级的学生，分别集中在北京大学、清华大学及兰州大学，学习原子能知识，抽调部分优秀教师进修原子能专业，培养师资力量，并在北大、清华筹建原子能系；二是经国务院批准，由蒋南翔、钱三强负责，在苏联、东欧的中国留学生中，选拔专业相近的学生改学原子能专业；三是1956年4月，