

俄罗斯乏燃料后处理工业化规划与实现前景概述

刘宇

(黑龙江省林业职业技术学院, 黑龙江牡丹江 157011)

摘要: 2000年后,俄罗斯先后出台《乏燃料处理理念与长期计划》等系列文件,完成燃料循环后端行业顶层设计,系统部署落实乏燃料后处理行业发展方向和重点项目,探索核燃料循环闭合道路。本文介绍俄罗斯乏燃料后处理行业发展现状,研究其行业特点及其面临的问题,重点分析其乏燃料后处理工业化规划与实现前景,指出存在于行业内部的相关疑问。最后,结合我国核电产能不断提高、核电技术正寻求走向世界的现实,借鉴俄罗斯经验,提出我国乏燃料后处理行业发展建议。

关键词: 俄罗斯;乏燃料;后处理技术;核燃料循环闭合

中图分类号: TL24 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2017.05.010

俄罗斯是世界上最早进入核电开发领域的国家之一,拥有完备的核工业体系。在核燃料技术路线选择方面,一直视乏燃料为资源,坚持探索核燃料闭合循环道路。2000年后,出于发展核能工业、解决苏联“核遗产”及核电站乏燃料无节制累积等问题的需要,俄罗斯国家原子能公司(Rusatom)作为行业管理者,制订产业发展规划,推动出台相关联邦法案和配套专项计划,在核电产业发展总框架下,落实乏燃料后处理技术升级和产业发展规划。

1 乏燃料后处理行业发展现状

1.1 政策导向与立法安排

俄罗斯现有核燃料循环实为开放路线,即除极少量能得到后处理外,绝大部分乏燃料都贮存在电站冷却水池和中央贮存库内。但作为坚定的乏燃料后处理派,俄罗斯国家原子能公司以实现核燃料循环闭合为目标,于2008年制定《乏燃料处理理念》^[1],将后处理、裂变产物再利用作为国家政策基本原则,从燃料循环终结阶段角度探索向闭合路线过渡。

《乏燃料处理理念》对俄罗斯核燃料产业发

展做出长期规划,将构建长期可控乏燃料贮存体系、研发安全可行后处理技术、创造放射废物终极隔离(填埋)条件、再生产品适量用于燃料循环等战略子项纳入其中。俄罗斯国家原子能公司采取阶段式安排,以2030年前为准备期,计划完成系列骨干建设项目,初步解决乏燃料无限制累积问题;2030—2050年为主体期,落实自然安全快中子堆建造、钚与铀238再循环项目,推动核能产业向“创新能源”升级。

为实现核燃料生命周期终结段战略,俄罗斯国家原子能公司在2011年出台《2011—2020及至2030年前基础设施建设与乏燃料后处理计划》(以下简称《2030年前处理计划》)^[2],将有关乏燃料立法工作列为重点,优先排在计划第一阶段(2011—2015年)推动实施。其中,除指导乏燃料后处理与服务定价等所需分级标准和行业规范等优先级文件外,重中之重的内容是在联邦法案层次制定《乏燃料处理法》。

依立法者的初衷,《乏燃料处理法》是以同期出台的《放射废物处理及部分俄罗斯联邦法案修正案》^[3]为蓝本,结合乏燃料特点而制定的另一部

作者简介:刘宇(1970—),男,译审,主要研究方向为产业创新政策。

收稿日期:2017-04-20

具高度相似和关联性的联邦法律。但因乏燃料被定性为资源而放射废物为废物的理念差异，以及核燃料闭合循环技术存在不确定性等问题引起的较大争议，俄罗斯国家原子能公司于2015年被迫暂时放弃该立法设想，原定参照放射废物管理办法建立国家乏燃料统一管理系统的构想也不得不延后。

1.2 乏燃料后处理能力

俄罗斯民用乏燃料主要来自10座核电站、10艘原子破冰船和境内外的科学实验堆，突出特点是数量大、类型多、技术特点各异。

能源堆主力是水-水高能堆（VVER）、压力管石墨慢化沸水堆（RBMK），两种堆型及其众多改型均采用陶瓷二氧化铀燃料。前者后处理受技术限制，后者则因经济效益过低不具可行性，目前两者都贮存在库房中，分别累计达到6300和14259吨^[4,5]。钠冷快中子堆（BN）和小型能源堆（KLT-40S）目前装机数量较少。原子破冰船用动力系小型压水堆，迄今共有五种型号，其铀铝合金乏燃料在RT-1厂（玛雅克放化厂的厂中厂）处理，铀钍合金燃料直至2015年后才具备处理能力。俄产科研堆燃料组件结构多变，燃料合金与结构材料复杂，且全部采用高浓缩铀燃料（铀235丰度90%~93%）。乏燃料除小部分运至RT-1厂处理外，大部分都存放在各单位临时贮存库房中。

受技术和经济等因素限制，俄罗斯长期奉行乏燃料搁置政策。自1976年以来，仅建成一座民用乏燃料处理厂（为RT-1厂），采用PUREX流程，处理VVER-440、BN-600、舰船动力堆和实验堆乏燃料。RT-1厂的放化作业过程属“脏”生产，伴生大量高放液体废物。自投产以来，从未达到年处理400吨乏燃料的设计产能。

2 乏燃料后处理行业发展特点及问题

2.1 以商业化为目标的发展方向

2011年11月，俄罗斯国家原子能公司批准《2030年前核能材料与设施生命周期终结段（Back-end）发展战略》基本准则（以下简称《2030前战略》）^[6]，为终结段业务领域发展设定两个关键方向：有效解决国家所面临的公共问题；实现产业构建与商业开发。在《2030前战略》提出的任务中，俄罗斯国家原子能公司将打造利润丰厚的国际乏燃料商业处

理业务列为最优先选项，次序排在解决核遗产与放射安全等公共问题之前。其目标是未来在行业内成为具全球影响力的重要角色，业务将专注于向新入市核能国家提供燃料租赁服务，为运行VVER反应堆国家提供乏燃料后处理及后处理技术转让服务。《2030前战略》宣称，若俄罗斯能顺利完成基于快堆的闭合燃料循环，燃料租赁业务将成为乏燃料环节的主要服务内容，即乏燃料回运俄罗斯后处理，生产剩余物留在俄罗斯长期贮存。但同时也指出，该领域的商业化前景将取决于两个因素：一是乏燃料处理造价对国外用户是否具有吸引力；二是乏燃料处理合同规模是否能满足生产线长期运行需求。

俄罗斯国家原子能公司认为，鉴于本国相当数量的乏燃料产自生苏联时期，当前不具备仅靠核工业企业筹措资金解决这一问题的条件，政府应承担起发展乏燃料后处理基础设施建设的责任，并承担与之相关的风险。

基于对国际乏燃料处理市场的分析结果，俄罗斯国家原子能公司在《2030前战略》中提出，一旦本国的快堆计划得以成功实施，将使其有能力进入一个潜在规模达250亿美元（按2010年价格）的乏燃料业务市场。而当前实际市场与潜在市场规模之间存在巨大差距，主要原因是缺乏乏燃料处理技术。

2.2 核燃料循环模式决而未定

在《2030前战略》的主要目标中，建立国家乏燃料与放射废物统一系统和解决核遗产问题占有重要地位，并着重提出，乏燃料终结处置亟须确立核燃料循环模式，并基于此发展乏燃料后处理及放射废物填埋设施。但在《2030前战略》出台时，俄罗斯核电界对燃料循环模式并未形成一致意见，只是提出了几个可供选择的方案：

- （1）快堆与热中子堆燃料复合式闭合循环；
- （2）热中子堆钚铀混合氧化物（MOX）燃料闭合；
- （3）在快堆和热中子堆MOX燃料中将钚烧尽；
- （4）长期贮存/填埋，即将乏燃料长期贮存，或在可提取条件下将其填埋至地质棺材中。

事实上，俄罗斯国家原子能公司内部的主导性

意见倾向于第一种燃料循环模式，即快堆与热中子堆燃料复合式闭合循环。但同时强调，针对这一燃料循环模式，若 2030 年前仍缺乏经济可行的技术方案，则应确保有条件实施搁置方案，即转而选择第四种方案。围绕第一种燃料循环模式，设置有三个关键决议及时间节点。

2015 年：编制快中子堆设计预算书，论证其冷却介质安全性及未来建造成本。

2020 年：取得乏燃料后处理实验展示中心（ODC）热中子堆乏燃料加工试验结果、热中子堆乏燃料工业化加工厂设计方案、热中子堆 MOX 燃料和乏燃料加工高放废物固化填埋技术 R&D 成果、不同燃料循环模式总电价分析结论。

2030 年：取得在中 / 高放废物地质填埋点终结隔离乏燃料可能性研究成果、热中子堆 MOX 燃料测试结果、首批次快中子堆运行结果、在多功能放化厂验证闭合式快堆乏燃料循环参照技术成果、工业化加工和生产快堆 / 热中子堆铀钚燃料工厂设计。

3 乏燃料后处理工业化规划与前景

3.1 集中处理模式为主导

俄罗斯采取乏燃料集中贮存和后处理模式，玛雅克放化厂（RT-1 厂，位于车里雅宾斯克州奥泽尔斯克）和矿业化学联合厂（以下简称矿化厂，位于克拉斯诺亚尔斯克州日列兹诺戈尔斯克）作为俄罗斯国家原子能公司核与放射安全体系骨干加工与贮存企业，近年都在提升贮存和后处理能力。

2007 年后，在《2008 及至 2015 年期间核与放射安全保障》专项计划支持下，RT-1 厂原 2 500 吨库容量规划升级。矿化厂在原 6 000 吨湿法贮存库扩容至 8 600 吨的基础上，于 2011 和 2015 年分两期新建成容量为 9 200 和 15 870 吨的 RBMK-1000 乏燃料组件干法贮存库，以及容量为 8 600 吨的 VVER-1000 乏燃料组件干法贮存库。同时，针对 VVER-1000 乏燃料的集装箱贮存库规划已提上日程。

除提升集中贮存能力，加快 VVER 和 RBMK 乏燃料离堆贮存以保障核电站安全外，以实现核燃料循环闭合为目标，根据《2030 年前处理计划》安排，以《2008 年及至 2015 年期间核与放射安全保障》与《2016 及至 2020 年期间核与放射安全保障》

两个联邦专项计划资金为支撑，俄罗斯国家原子能公司在乏燃料后处理技术探索和产能建设方面的措施有如下几条。

（1）RT-1 厂技术改造

RT-1 厂于 1977 年投产，生产工艺由乏燃料区间接贮存、燃料组件机械粉碎、PUREX 流程提取有价值元素和高放废物玻璃化处理等组成。自 2011 年起，RT-1 厂开始技术升级改造，旨在提高现有技术安全性、开发新型萃取工艺、增加可处理乏燃料品种，目标是在 2018 年前掌握所有俄产乏燃料处理技术，成为全能型放射化学企业。2015 年，建成 AMB 乏燃料加工线，将在 2018 年底前确定此类燃料贮存和加工任务^[7]。2016 年，建成残损（破损、失密）RBMK 乏燃料处理设施，不适宜干法贮存的 RBMK 残损燃料开始从电站向 RT-1 厂外运，此项工作计划将延续至 2030 年^[8]。2016 年底，RT-1 厂首次完成 VVER-1000 乏燃料示范批次加工，正式具备该型号乏燃料工业化加工能力^[9]。

RT-1 厂大部分工艺虽广为世界放射化学业所熟知，但具有鲜明特点：三条生产链具有多功能性，不仅能独立加工结构与合金成分各异的燃料组件，还能实施联合作业，见图 1^[10]。

2016 年，RT-1 厂对铀精炼工艺进行改造，经双循环改单循环，使化学试剂用量和中强度放射废物数量实现双降^[11]。厂内原有四套电炉，用于将高放废物固化成磷酸铝和硼硅酸盐玻璃。2016 年后，第五套电炉完工，玻璃化新工区建设启动^[12]。

（2）乏燃料后处理实验展示中心建设

2006 年，原俄联邦核能署批准《基于新技术的乏燃料后处理实验展示中心建设计划》，决定依托矿化厂研发第三代乏燃料后处理技术，解决 VVER 乏燃料累积问题，落实核燃料循环闭合战略关键环节。2007 年，在编制《2008 及至 2015 年期间核与放射安全保障》联邦专项时，俄罗斯国家原子能公司将该项目作为专项实施措施，以《基于新技术的 VVER-1000 乏燃料后处理实验展示中心建设》名义列入其中，后延续至《2016 及至 2020 年期间核与放射安全保障》联邦专项，由联邦财政提供资金保障。

2007—2011 年间，乏燃料后处理实验展示中心相关 R&D 工作完成。经联邦生态技术与核监督

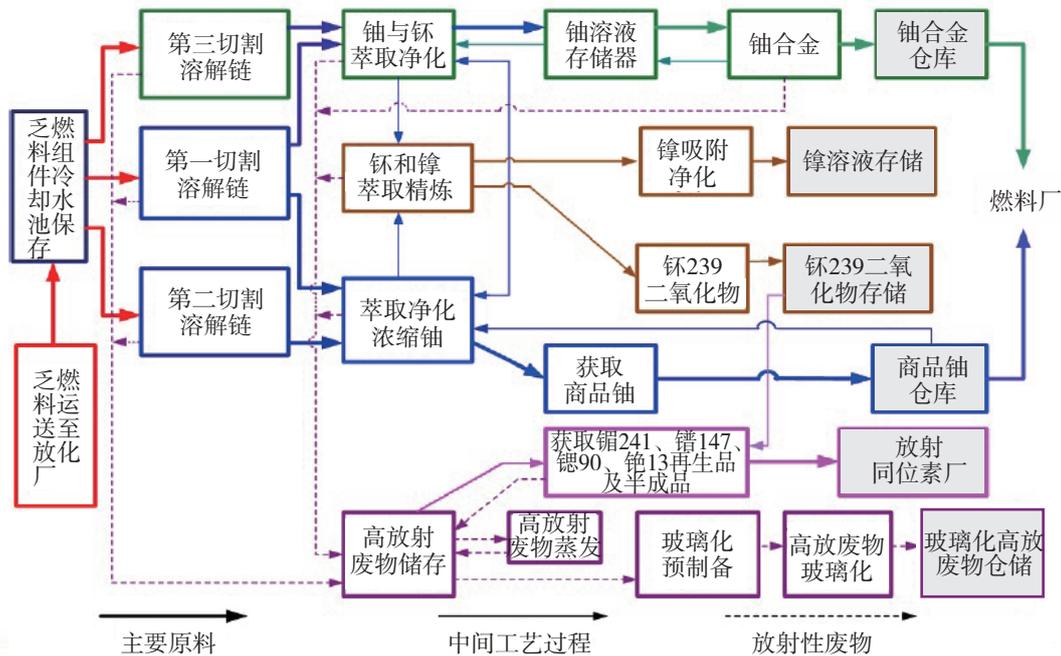


图1 RT-1厂乏燃料处理工艺流程图

局审核，于2013年取得施工许可，计划分两个阶段实施：2015年启动单元投产（实验热舱），验证热堆与快中子堆乏燃料后处理及核燃料循环闭合新技术，达成5吨乏燃料年处理能力；2018年二期工程投产，启动VVER-1000乏燃料后处理核心工艺，实现250吨乏燃料年生产能力^[13]。验证VVER-1000乏燃料后处理创新技术，实验乏燃料后处理新型设备，为能源堆乏燃料后处理技术复制及后续以模块叠加方式扩大产能提供原始数据。

乏燃料后处理实验展示中心采用Khlopin镅研究所开发的“简易PUREX”流程，加入大量热化学作业，终端产品为铀氧化物粉末、铀钚氧化混合物、锕系元素和裂变产物固化物。其中，铀钚氧化物粉末未来用于矿化厂MOX燃料饼生产，裂变产物则固化至安全和最小化状态，安排长期受控贮存。乏燃料后处理实验展示中心后处理技术有两个特点：一是完全杜绝液体放射废液排进自然环境；二是与现行技术相比，能相当程度地减少高-中放射废液固化数量^[14]。因技术通用性特点，乏燃料后处理实验展示中心在下一阶段可用于验证快中子堆燃料组件后处理工艺，以进一步减少放射废物生成数量，提升贵重金属元素使用效率。乏燃料后处理实验展示中心

基本工艺流程见图2^[15]。

乏燃料后处理实验展示中心高放射性废液固化成硼硅酸盐玻璃铸模，以不锈钢桶密封后置入设计容量为1850桶的临时贮库保存，经贮存后交放射废物国家运营商填埋。中放射废液蒸发冷凝水重复循环。非生产过程放射废液固化为水泥铸模，以集装箱密封后转至设计容量为6000箱的临时堆场。非生产过程固体废物分级后在堆场长期贮存，然后移交放射废物国家运营商处理。

矿化厂专家乐观估计，乏燃料后处理实验展示中心技术可支撑其实现巨大利润空间。与世界同类企业1000美元/千克的乏燃料处理费相比，乏燃料后处理实验展示中心未来的处理费可降至600美元/千克的水平^[16]。

3.2 站内循环模式探索

2010年2月，俄政府批准《2010—2015及至2020年间新一代核能技术》联邦专项计划^[17]，目的是基于燃料循环闭合型快中子堆研发新一代核能技术，为大规模发展自然安全核能奠定技术基础。但该计划在执行中出现碎片化倾向，虽参与单位和项目众多，但实际结果却仅能体现在多功能实验快堆与MOX燃料两个方面。2011年7月，俄罗斯国

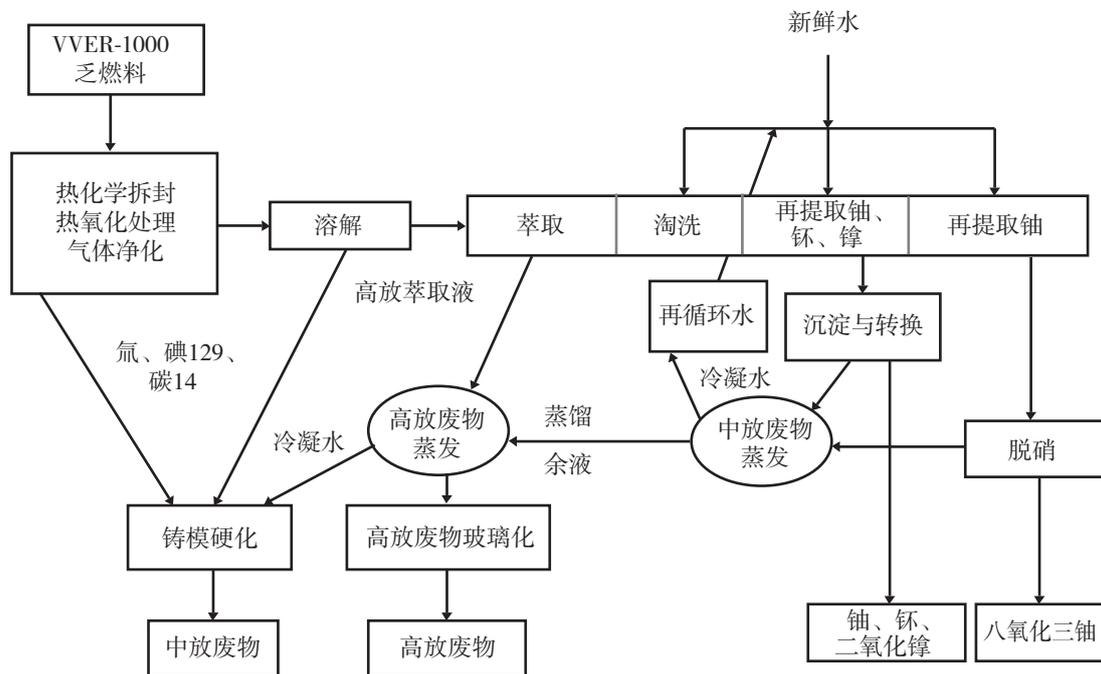


图2 乏燃料后处理实验展示中心基本工艺流程

家原子能公司出台 PRORYV 项目实施指令，以整合零散研发项目，顺序完成基于快中子堆的燃料循环闭合技术验证，证明核电“自然安全”原则的适用性。

2012年，经俄罗斯国家原子能公司与托姆斯克州政府协议，PRORYV项目落户谢维尔斯克市，计划以当地西伯利亚化学联合厂为依托，建造能源实验展示综合体(ODEK)，实现站内燃料循环闭合。能源实验展示综合体由 BREST-OD-300 铅冷快中子堆发电机组及燃料闭合循环厂组成，发电机组包括一台 BREST-OD-300 反应堆、一台涡轮发电机和一套传统热/电供应控制系统；燃料循环厂包括经辐射铀钚(氮化)混合燃料加工模块和新鲜燃料制造模块两部分。建设进度安排见图3^[18]。

第一阶段是燃料循环厂铀钚混合氮化燃料生产/再生产模块，主要工艺线有铀钚混合氮化热碳合成、铀钚混合氮化燃料饼制作与燃料棒组装。另外还有核材料库成品库和燃料组件、燃料棒配件库，以及与其配套的中、高、超低放射废物处理设施等。为向使用 BREST-OD-300 乏燃料加工回收产品制造燃料阶段升级，该模块预设有含铀燃料棒制备工区。

该模块燃料初装生产期设计产能 14 吨/年，燃料再生产模式时期为 5 吨/年。

第二阶段是 BREST-OD-300 自然安全反应堆及其配套基础设施建设。该型反应堆研究始于 20 世纪 80 年代末的 BREST 项目，是新式大型商用反应堆实验原型机，电热功率分别为 300 和 700 兆瓦，由 JSC“NIKIET”研究所主导设计。所谓“自然安全”原则，即在设计中排除反应堆过快加速，排除冷却介质(铅)沸腾，维持燃料棒包皮与燃料饼大熔化冗余，利用铅的化学特性、惰性及高沸点降低其产生损耗、火灾和汽爆概率。BREST-OD-300 是世界首个重金属冷却介质快中子反应堆，使用优质致密燃料——铀钚氮化混合燃料。发电机组采取双回路设计，第一和第二回路冷却介质分别为铅和临界参数水。

第三阶段是燃料循环厂乏燃料后处理模块，建筑布局与燃料生产/再生产模块相连。该模块采用热电化与水法冶金复合工艺，生产流程分为三段：燃料组件加工前制备、热化学炼制和水法冶金炼制。以冷却时间不超一年的 BREST-OD-300 乏燃料为初始原料，终端产品为铀-钚-镅混合氧化物粉末，



图3 能源实验展示综合体建设进度安排

用于 BREST-OD-300 燃料再生产。投产后拟形成 5 吨乏燃料 / 年的加工产能。能源实验展示综合体放射废物经加工和固化封装, 临时贮存后移交国家运营商填埋。

第四阶段生产与再生产模块向使用 BREST-OD-300 乏燃料加工回收产品生产核燃料升级。

PRORYV 是俄罗斯国家原子能公司最重要的创新项目之一, 集团不仅为其提供了充裕的资金, 还为此在内部专门设立项目管理办公司, 以期借快中子堆闭合燃料循环, 达到提高铀利用效率和减少乏燃料的目标。

3.3 乏燃料后处理工业化前景

自进入 21 世纪以来, 俄罗斯积极发展乏燃料后处理技术和产能建设, 探索集中处理和站内循环两种技术模式, 并启动相关建设项目。但对于各项的实现前景, 核电及社会各界的意见表达可归纳为如下两点。

(1) 集中处理仍将是燃料循环闭合路线的中长期选择

RT-1 厂作为俄罗斯规模最大、技术能力最强的乏燃料后处理企业, 按计划最少将运行至 2030 年。以实现全能型放化企业为目标, 该厂现正利用联邦专项资金推进技术升级, 逐步扩大后处理技术能力。与此同时, 为解决生态安全保障问题, RT-1 厂正加大工作力度, 采取高放废液玻璃化及贮存库

扩容、露天污水池封存和填埋等措施来减少甚至终止放射废物排放。随着后处理技术能力提升, 预计该厂将在 AMB 等问题乏燃料处理方面发挥重要作用, 解除核电业多年的困扰。

在俄罗斯国家原子能公司核燃料循环闭合战略中, 年设计产能 1 500 吨乏燃料的 RT-2 厂是其最重要的组成部分。乏燃料后处理实验展示中心作为 RT-2 厂技术验证项目, 属第三代乏燃料后处理技术。自开工建设以来, 尽管工程进度有所延迟, 但建设与测试工作正有序推进。乏燃料后处理试验展示中心达成年处理 250 吨乏燃料设计产能后, 在对其运行结果进行评估基础上, 将筹建 RT-2 厂(不早于 2020 年), 用于 VVER-1000 乏燃料后处理, 生产 VVER 和快堆 MOX 燃料。届时, 乏燃料后处理实验展示中心将转为专业处理残损燃料, 承担各类放射化学技术与设计验证任务。

2025—2030 年间, 俄罗斯国家原子能公司的目标是实现热堆与快堆燃料循环相互协作, 形成新型乏燃料后处理模式, 见图 4。

乏燃料后处理实验展示中心项目是决定未来 RT-2 厂前景的关键因素, 在此接受验证的系列新技术和新工艺, 也将影响到 PRORYV 项目的发展进度。

(2) 站内燃料循环模式与 PRORYV 项目争议犹存

PRORYV 是俄罗斯国家原子能公司的前瞻项

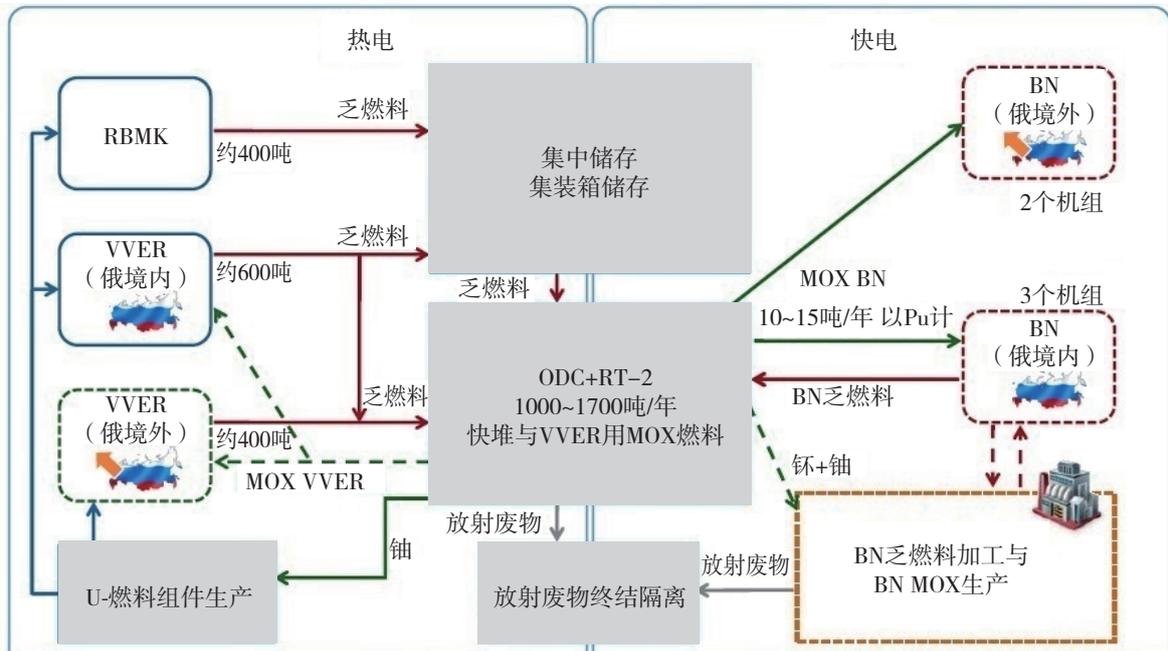


图4 快堆与热堆燃料循环协作流程图

目，若能顺利实施，除核燃料循环闭合将取得重大突破外，还将彻底颠覆世界现有核电理念和产业生态。基于 PRORYV 项目模式，未来将形成核电站与放射化学厂、燃料厂一体化，燃料在电站内封闭循环的新型核电。项目虽得到政府大力支持，但有关其商业前景和技术可行性的争论却一直未平息。

首先，BREST-OD-300 反应堆的经济技术可行性有待商榷。

2012 年公布的信息显示，PRORYV 作为技术验证项目，资金需求高达 400 亿卢布（约合 10 亿美元），其中，205 亿卢布用于 BREST-OD-300 反应堆建造，170 亿卢布用于站内燃料循环，可谓资本高度密集。但在项目将取得成功的假设前提下，针对未来工业化核电站建设造价、发电价格能否被市场接受等问题，主管部门目前尚未能提出有说服力的精算数据。

从现有情况判断，该类核电站在 21 世纪中叶前实现批量化建造基本无望，未来几十年内确定无法对俄罗斯能源市场产生实质影响^[19]。

其次，铅介质与氮化燃料前景不明。

截至目前，世界各国尚未有使用纯铅作反应堆冷却剂的成功经验。BREST-OD-300 铅冷却剂数量

达 8 500 吨，根本问题除将其加热并保持液态存在不确定性、可能要耗资耗时研发与其相适应的耐腐蚀合金与钢材外，蒸汽发电机、主循环泵等主要设备的配套能力、可维修性也值得怀疑。

氮化燃料从未得到任何实际应用。法国曾推出此类燃料的大型研究计划，但在用俄罗斯 BOR-60 反应堆实现 12% 的燃烧深度后，研究工作因不具前景而被终止。俄罗斯氮化燃料研究正在进行，测试前景尚不清晰。部分专家认为，需按 VVER 氧化物燃料验证程序，对氮化燃料进行全面验证，以证明其对在研反应堆的适用性。

再次，站内燃料循环问题多。

按站内燃料循环设计，反应堆旁必须建造全功能放射化学厂和燃料厂。BREST-OD-300 乏燃料卸载后冷却时间不超一年，经站内放射化学厂处理后，用回收材料再制成新鲜燃料饼和燃料组件，装入反应堆循环使用。从本质上来讲，PRORYV 项目的燃料站内循环，是燃料理念从“清洁燃料—脏剩余物”向“脏燃料—清洁剩余物”的根本转变，这是否真能带来安全性，仍具有不确定性。但高放“热”乏燃料加工、材料回收和新燃料制作都集中在电站厂区内，造成高危企业过度聚集，潜在威胁增大。另外，

与当前将脏燃料隔绝至人烟稀少地区处理的做法不同,未来脏燃料处理将与人为邻。而且,因裂变剩余物终须做隔离处理,废物也无法真正做到洁净。

4 对我国乏燃料后处理发展的建议

乏燃料后处理属技术与投资密度双高行业,世界范围内只有少数国家有能力开展此项业务。考虑到我国核电产能不断提高、核电设备正走向世界、未来乏燃料压力不可避免地增大的现实,未雨绸缪着手解决乏燃料后处理问题,已成为国家核电发展的必经之路。

(1) 完善核安全法律体系建设

在核安全法制和机制建设方面,应借鉴俄罗斯经验,尽快制定《原子能使用法》和《核安全法》,以天然垄断模式完成对全行业管理体制和机制的顶层设计。从认识上将乏燃料后处理的重要性提升至与核电同等地位,在国家法律和行业规定两个层次为全行业划定清晰行为边界,制定中长期行业发展规划,营建乏燃料后处理和放射废物处理两个国家运营和监管体系,切实做好乏燃料和放射废物管理。

(2) 加强基础研究工作

我国核电技术来源多样,已建和在建堆型各异,既有国产堆,也有来自美、法、俄等国的核电机组。反应堆技术的多样性决定了我国乏燃料后处理技术的复杂性。在俄罗斯第三代乏燃料后处理技术即将进入中试、第四代技术研发全面展开的情况下,建议由政府核燃料循环理念及后端处理设施建设方面做出总体安排,以产业化为目标,以专项资金为保障,解决经费不足、研发力量分散、基础研究缺乏支持等问题,推动后处理技术研发基地建设,为未来开展乏燃料后处理产业化做好知识与技术储备。

(3) 审慎对待规模化乏燃料后处理厂建设

在当前乏燃料后处理技术尚未成熟,产业化运作经济和社会效益均不确定的情况下,俄罗斯贮存与后处理平行发展的做法不失为一种适当选择。

目前,我国乏燃料基本都贮存在电站的冷却水池中,干法贮存仅供应急之需。建议尽快确定乏燃料贮存路线,由国家统一规划建设中央贮存库,首先解决电站库容紧张乃至危及安全的问题,做好打乏燃料后处理持久战的准备。

PUREX 流程建设和生产成本高昂,工艺过程

产生大量高放废液,须做地质填埋处理。考虑到我国既未掌握乏燃料后处理核心技术,又不具备放射废物处理设施,加之世界铀市场多年处于低价位、再生铀成本与竞争力成疑等现实问题,在暂无法凝聚社会共识的情况下,建议慎重对待处理厂建设,以免造成不必要的损失。■

参考文献:

- [1] Барышников МВ. Концепция и долгосрочная программа обращения с ОЯТ[R]. АТОМЭКСПО, Москва, 2012.
- [2] Росатом. Программа создания инфраструктуры и обращения с ОЯТ на 2011—2020 годы и на период до 2030 года[S/OL]. [2017-04-17]. <http://programma.x-pdf.ru/16energetika/202950-1-programma-sozdaniya-infrastrukturi-obrascheniya-oyat-2011-2020-godi-period-2030-goda-2011-pasport-programmi-sozdaniya.php>.
- [3] РФ. ФЗ "Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации"[S/OL]. [2017-04-17]. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116552/.
- [4] Владимир Сычев. Тестовую переработку топлива реакторов ВВЭР-1000 могут провести в этом году[N/OL]. [2017-04-17]. <https://ria.ru/atomtec/20161121/1481803479.html>.
- [5] Олег Крюков. Решение накопленных проблем «ядерного наследия» [EБ/OL]. [2017-04-17]. <http://www.ar2013.rosatom.ru/156.html>.
- [6] Росатом. Основные положения «Стратегия развития заключительной стадии жизненного цикла объектов и материалов использования атомной энергии (Бэкэнд) до 2030 года» [S/OL]. [2017-04-17]. http://bellona.ru/assets/sites/4/2015/06/fil_rosatom-backend1.pdf.
- [7] СЦК РОСАТОМ. ПО «Маяк» будет перерабатывать топливо с реакторов АМБ Белоярской АЭС[N/OL]. [2017-04-17]. <http://www.skс.ru/press/news/item/4228567/>.
- [8] Росатом. НаПО «Маяк» начинается программа по переработке некондиционного ОЯТ реакторов РБМК [N/OL]. [2017-04-17]. <http://xn---2030-bwe0hj7au5h.xn-->

- plai/society/news/na-po-mayak-nachinaetsya-programma-po-pererabotke-nekonditsionnogo-oyat-reaktorov-rbmk/.
- [9] Росатом. Маяк готов к промышленной переработке ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 [N/OL]. [2017-04-17]. <http://xn--2030-bwe0hj7au5h.xn--plai/about/news/mayak-gotov-k-promyshlennoy-pererabotke-oyat-reaktorov-vver-1000/>.
- [10] Д.Н.Колупаев. Развитие технологий переработки ОЯТ в России. Атомэко-2015.[R]. Москва, 2015.
- [11] Росатом. На ПО Маяк внедрена одноцикличная технология переработки отработавшего ядерного топлива[EB/OL]. [2017-04-17]. <http://rosatom.ru/journalist/news/na-po-mayak-vnedrena-odnotsiklichnaya-tekhnologiya-pererabotki-otrabotavshego-yadernogo-topliva/#>.
- [12] ПО Маяк. На радиохимическом заводе ПО Маяк новая печь по остекловыванию высокоактивных отходов начнет работать в сентябре [N/OL]. [2017-04-17]. http://www.po-mayak.ru/wps/wcm/connect/mayak/site/info/news_main/bef0f5004df887539cd4fe0ccfb48b81.
- [13] ГХК. Выбран генеральный подрядчик строительства второго пускового комплекса ОДЦ[EB/OL]. [2017-04-17]. <http://www.atomic-energy.ru/news/2016/08/08/68071>.
- [14] ГХК. Создание опытно-демонстрационного центра (ОДЦ) по переработке ОЯТ[EB/OL]. [2017-04-17]. <http://www.sibghk.ru/activity/odc.html>.
- [15] АВ Хаперская. Опыт-демонстрационный центр ГХК: задачи, технологии, перспективы[R/OL]. [2017-04-17]. <http://www.atomic-energy.ru/technology/33473>.
- [16] Nuclear Ru. Технические решения ОДЦ позволят снизить стоимость переработки ОЯТ до US\$600.[EB/OL]. (2012-08-22) [2017-04-17]. <http://www.atomic-energy.ru/news/2012/08/22/35470>.
- [17] Правительство РФ. О внесении изменений в федеральную целевую программу "Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года"[S/OL]. [2017-04-17]. <http://government.ru/media/files/41d48a290e16d2fa046b.pdf>.
- [18] СХК. Годовой отчет по результатам работы за 2013 год[R/OL]. [2017-04-17]. http://www.atomsib.ru/files/2013/annual_report2013_SHK.pdf.
- [19] Александр Никитин. В вечных поисках перпетуум-мобиле[J]. Экология и права, 2015, 1(57): 8-12.

SNF Reprocessing Industrialization Plan and Development Prospect in Russia

LIU Yu

(Heilongjiang Forestry Vocation-Technical Collage, Mudanjiang, Heilongjiang 157011)

Abstract: After 2000, Russia introduced a series of documents such as “The Processing Concept and Long-Term Plan for Spent Fuel”, completed the top-level design of fuel cycle back-end industry, systematically deployed development direction and key projects of spent nuclear fuel (SNF) post processing industry, explored the road of nuclear fuel cycle closure. This paper introduces the present situation of spent fuel post processing industry in Russia, studies its characteristics and problems, emphatically analyzes the industrialization planning and prospect of implementation of spent fuel post processing industry, and points out the related questions in the industry. Finally, combining the reality of the increasing nuclear power capacity of China, whose nuclear power technology is seeking to go global, we put forward development suggestions for spent fuel post processing industry of China, drawing lessons from Russian experience.

Key words: Russia; spent nuclear fuel; reprocessing technology; closed nuclear fuel cycle