

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.007

# 乏燃料后处理产业的市场前景及发展路径

李想, 张宏韬

(上海市核电办公室 核电产业处, 上海 200031)

**摘要:** 随着我国核电重启政策的施行, 核电装机容量逐步提高, 乏燃料的产生量、离堆量以及外运需求量均呈现快速上涨趋势, 而我国乏燃料后处理产业发展相对滞后, 需求和处理能力的矛盾已经成为亟待解决问题。文章通过介绍乏燃料后处理主流技术的工艺流程, 分析该产业发展的紧迫性和巨大的市场前景, 探索产业发展路径, 寻找产业链发展的着手点, 为相关企业和从业人员出谋划策。

**关键词:** 乏燃料; 后处理; 市场前景; 发展路径

中图分类号: TL249

文献标志码: A

文章编号: 2095-8687(2017)03-0035-04

## Market Prospect and Development Path for the Industry of Spent Fuel Recycle Management

LI Xiang, ZHANG Hongtao

(Department of Nuclear Power Industry, Shanghai Municipal Nuclear Power Office, Shanghai 200031, China)

**Abstract:** With the strategy implementation of restarting nuclear power, the number of power station grows gradually, the quantity of spent fuel from reactors and the transport demand show a rapid upward trend. However, the industry development of spent fuel recycle management lags behind, the contradiction between demand and processing ability has become an urgent question. By introducing the process flow, this paper analyzed the urgency of development and huge market prospect, explored the path and starting point, gived suggestions to relevant enterprises and practitioners.

**Key words:** spent fuel; reprocessing; market prospect; development path

核电, 作为我国继高铁之后的又一国家名片, 是我国落实“一带一路”战略的重要抓手, 安全有效的发展核电, 是我国十三五期间重要的能源转型发展的重要方针, 其中核燃料循环是发展核电过程中不可忽视的一个环节, 在核电装机容量大幅增加的背景下, 如何处理日益增多的核电乏燃料, 保障核工业体系安全稳定运行, 同时更好的节约资源、控制成本, 就成为核电领域发展面临的新问题, 具有重要的意义。

### 1 乏燃料后处理技术概述

核电站所用的燃料, 如图 1 所示, 从矿产开发

到最终的地质填埋, 通常会经历一个完整的燃料循环。其中随着核电的运行, 燃料中裂变核素逐步消耗, 不足以维持裂变反应, 从反应堆取出的燃料称为乏燃料, 具有较强的放射性, 半衰期可达数万年, 目前世界上运营核电的国家主要有两种处置方式:

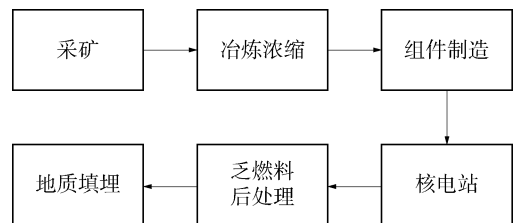


图 1 核燃料循环

Fig. 1 The cycle of nuclear fuel

收稿日期: 2017-01-11

作者简介: 李想(1985), 男, 河南洛阳人, 工程师, 硕士, 主要从事核电项目管理, 产业发展推进工作(e-mail)lixiang0831@163.com。

一是通过简单的剪切和封装后运往合适的地点直接深埋; 二是建立后处理厂, 分离乏燃料中 Pu、

U 等有用的元素进行再利用,降低其活性及放射性,将高放射性废物填埋<sup>[1]</sup>。我国选择第二条处理技术路线已成定局。目前后处理厂这个环节具有较高的技术难度,处理技术主要有干法和湿法两种,其中以磷酸三丁酯(TBP)为萃取剂的湿法处理 PUREX(萃取回收 Pu 和 U 的英文缩写,如图 2 所示)是当今最为成熟的主流技术<sup>[1]</sup>,法国、日本等主要核电国家均采用此法,也是目前唯一实现商业运行的技术路线<sup>[2-3]</sup>。其工艺流程主要有以下几个步骤:乏燃料的剪切、剪切片的硝酸溶解、溶剂萃取分离裂变产物、溶剂萃取分离、提纯 Pu 和 U、脱硝,最终送往燃料制造厂制造新燃料,形成闭式循环。萃取后的高放废物进行贮存和玻璃固化,被分离的核裂变产物作为高放废液来进行处理<sup>[1]</sup>。

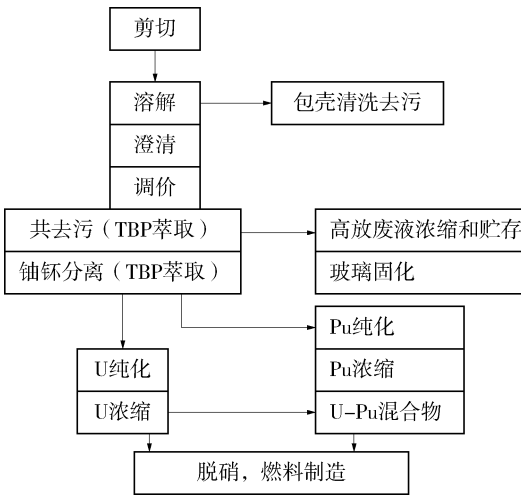


图 2 PUREX 技术后处理流程示意图

Fig. 2 The process flow of PUREX

## 2 国外后处理技术的业发展和管理模式

除去采用直接填埋乏燃料的国家,世界上拥有后处理技术的国家主要有法国、英国、日本、俄罗斯、印度等。

### 2.1 法国

法国是该领域产业链最为完备,技术经验积累最为丰富的国家,拥有三个后处理车间,UP1 于 1965 年运行,1998 年退役;UP2 于 1966 年运行,后扩建并于 1994 年运;UP3 于 1989 年运行。其中阿格厂采用成熟的 PUREX 技术,每年处理能力超过 1 000 t,同时可以生产超过 1 000 个玻璃固化容器,接收超过 200 个运输容器,为周边多个国家提

供服务,也是此次中法合作的主要参考项目,此外,法国还建立了相应 MOX 燃料制造设施。从运行监管体制来看,法国由 AREVA NC 公司负责后处理和再循环,圣戈班新技术公司(SGN)负责设计,法国核安全局(ASN)整体负责核安全管理和监督<sup>[4]</sup>。

### 2.2 英国

英国于 1952 年开始进行商业规模的后处理,共有三个后处理厂。B204,20 世纪 60 年代末进行改造,1973 年由于事故停运并关闭;B205 厂是为了对建在英国的 11 座 Magnox 核电站以及分别建在日本和意大利的另外两座 Magnox 核电站产生的乏燃料进行后处理;Thorp 厂于 1994 年开始运行。从监管运行体制来看,由英国核服务公司(INS)管理 MO 燃料制造,核安全管理局(NSD)负责核安全监管,英国核燃料股份公司(BNFL)负责核燃料的制造和运输及核设施的退役<sup>[5]</sup>。

### 2.3 日本

日本引进法国的技术,以阿格厂二号厂房为模板,兴建了 6 个所后处理厂,年处理能力为 800 t。日本建设和运行由核燃料有限公司(JNFL)负责,国家采用从各大电力公司抽取准备金建立基金的模式,按照投资比例分配各公司后处理份额。

## 3 我国后处理产业目前发展状况

### 3.1 产业发展的紧迫性

按照国际通行做法,乏燃料经过在堆贮存、离堆贮存后送至后处理厂。目前我国早期建设的大亚湾核电站已经实现乏燃料离堆贮存,秦山核电、田湾核电以及岭澳核电在堆贮存的乏燃料水池已经接近满容,与此同时,从 2016 年起,大亚湾核电需要离堆外运的乏燃料数将成倍增加,使我国一些在运机组存在乏燃料无法外运的风险<sup>[6-8]</sup>。如图 3 所示,从 2015—2020 年,乏燃料的产生量和累计量呈现快速上涨的趋势,预计到 2030 年,乏燃料离堆累积量将超过 2 万 tHM,因此,大力发展乏燃料后处理产业,建设后处理大厂,另外积极建设中间存储能力,解决乏燃料离堆问题,已经迫在眉睫,需与时间赛跑。

### 3.2 我国乏燃料后处理产业发展现状

我国于 2010 年建成第一座乏燃料后处理中间试验厂一中核四零四厂,该厂拥有一座容量为 500 t

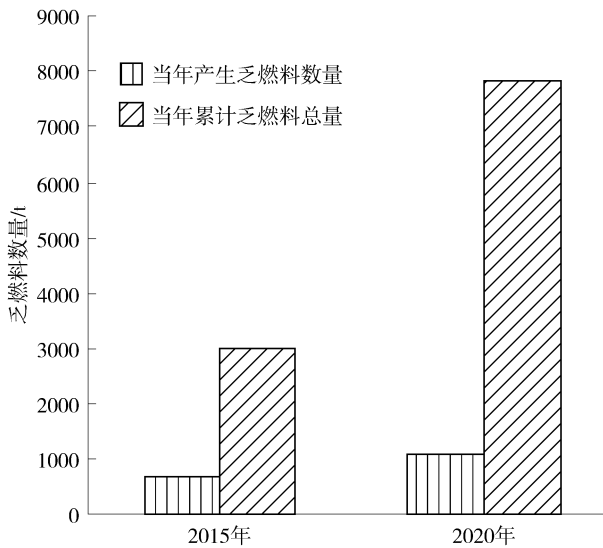


图3 乏燃料增长示意图

Fig. 3 The growth of spent fuel

的乏燃料贮存水池，正在建设一座800 t的乏燃料贮存水池，拥有年处理50 t乏燃料的能力，尚无法满足日益增长的处理需求<sup>[9-10]</sup>。2013年在法中元首的见证和推动下，中法合作核循环项目开始开展大量前期工作，2015年在甘肃建设国家级核燃料循环产业园，引进消化吸收法国800 t后处理大厂技术，项目合同于2017年生效，预计2020年开工，总投资超过1 000亿人民币<sup>[1]</sup>。我国同步开展200 t、800 t后处理厂的自主开发建设工作。资金保证方面，2010年我国建立了核电站乏燃料处理处置基金制度，2014年国家原子能机构印发了《核电站乏燃料处理处置基金项目管理办法》，对运行5年以上核电的上网电价征收0.026元后处理处置基金，预计到2020年，基金总额将达到数百亿元，这为产业健康发展打下了基础<sup>[2]</sup>。

## 4 针对后处理产业发展的思考和建议

### 4.1 密切跟踪最新的产业发展政策

自福岛核事故之后，政府和公众对核电安全发展的认识空前提升，核废料的妥善和安全处置的重要性亦被反复强调，目前核电后处理已经明确写入“十三五”规划纲要，上升至国家战略地位。《核安全法》草案也再次强调核废料处理问题，同时相关产业政策的落地，也将助力产业链的崛起。2016年7月，国务院印发《“十三五”国家科技创新规划》国发[2016]43号提出要“稳步发展核能与核安全技术

及其应用”，重点包括“后处理技术研发及应用”，并明确指出要“开展先进核燃料、乏燃料后处理、放射性废物处理”等研究。监管方面，目前我国核设施主要遵循《民用核安全设备监督管理条例》，以及同步施行的HAF601-HAF604四个部门规章，2014年起，核安全局已经启动核燃料循环设施重要安全设备管理的策略研究，根据《核燃料后处理厂建(构)筑物、系统和部件的分级》(EJ/T 939-95)对设备进行分级管控。因此，各个地方主管部门，相关企业应积极服务国家战略，满足监管要求，合理运用产业扶持政策，抓住快速发展的黄金时期。

### 4.2 加强公众沟通

燃料循环相关设施的建设，本是顺应行业发展，利国利民的项目，其安全性毋庸置疑，以法国阿格厂为例，目前运行45年，已累计处理约3万t来自各国的乏燃料，对周边人群带来的辐射剂量为0.03 mSv/a<sup>[2]</sup>，仅相当于自然界中辐射量的百分之一。从经济方面来讲，项目投资量大，可以带动周边配套产业的快速转型升级，然而近年来反核的声音却不绝于耳，甚至出现了江苏连云港的示威集会事件，导致核循环项目暂停。因此核电行业从业人员更应重视公众沟通，用先进的知识和信息的透明，让公众理解、让公众信任，让公众支持。

### 4.3 重视后处理产业技术、装备。

我国从事乏燃料领域的科研、设计单位较少，后处理经验几乎为零，此次引进消化国外先进技术任务主要落在以四零四厂、瑞能科技、原子能院为代表的中核集团，示范项目则以法国阿海珐公司为主导。设备方面，部分产品已经基本实现国产化，进入核电市场推广阶段，如中子吸收材料、常规机械电气设备。部分产品需在现有核电基础上进行适应性开发或改进生产，如远距离操作阀门、机械手、热室等。但PUREX技术的工艺流程主设备技术难度较高，我国基础相对薄弱，距离国产化仍具有较长的路线要走，如剪切机、溶液反应器、离心澄清器和脉冲过滤器、萃取分离器、玻璃固化装置等<sup>[3]</sup>。企业应结合自身的经验积累、人才储备情况，提前了解市场，进行研发攻关，在设备国产化的进程占领市场，进入附加值较高的领域，完成结构调整。

### 4.4 关注乏燃料运输储存领域的发展

目前我国核电大多集中在沿海地区，乏燃料后

处理体系位于我国的西北地区，随着在运电站的数量累计，乏燃料离堆储运是一个必然的发展方向，尽早建设一个涉及水路、公路、港口的运储体系具有重要的意义。根据法国阿海珐公司的建设经验，大型乏燃料转运枢纽的建设涉及面广，周期接近十年，涉及基础设施建设、特种车辆、指挥应急等多个层面，对于各个领域的企业来说，面临挑战的同时也获得了新的发展机遇。在乏燃料运输和外储过程中，除去中间贮存设施，储运罐成为必不可少的设备，也是相关企业业务拓展的重点领域之一<sup>[11]</sup>。目前国际上主要产品来自美国的 NAC-STC 公司，日本的日立公司以及西班牙的 ENSA 公司<sup>[2]</sup>。由于此类产品市场应用迫切，附加值很高，我国已有公司开始在此领域布局，通过和研究院所或国外成熟供应商合作的模式，购买技术，提高研发起点，以加快产业化的速度。西安核设备有限公司承担了我国乏燃料运储容器的样机研制工作，上海阿波罗机械与阿海珐 TN 公司联合生产干式储存金属内胆样机，国产化步伐逐步加快，产业重点布局恰当其时。

参考文献:

[1] 顾忠茂. 核能与先进核燃料循环技术发展动向 [J]. 现代电力, 2006, 23(5): 89-94.  
 GU Z M. Development trend of nuclear energy and advanced nuclear fuel cycle technology [J]. Modern Electric Power, 23 (5): 89-94. .

[2] 韦悦周. 国外核燃料后处理化学分离技术的研究进展及考察 [J]. 化学进展, 2011, 23(7): 1272-1288.  
 WEI Y Z. Progress and discussion on chemical separation technologies for nuclear fuel reprocessing developed abroad [J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(7): 1272-1288.

[3] 韦悦周, 吴艳, 李辉波. 最新核燃料循 [M]. 上海: 上海交

通大学出版社, 2015: 225-292.  
 WEI Y Z, WU Y, LI H B. The newest nuclear fuel cycle [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2015: 225-292.

[4] 白云生. 法国核燃料循环后端管理政策及发展情况 [J]. 核动态, 2007(6): 28-31.  
 BAI Y S. The management policy and development of nuclear fuel cycle in France [J]. Nuclear Dynamic, 2007(6): 28-31.

[5] 刘敏, 袁帅. 英国放射性废物管理及对我国的启示 [J]. 中国核工业, 2012(7): 24-27.  
 LIU M, YUAN S. Radioactive waste management in UK and its enlightenment to china [J]. China Nuclear Industry, 2012 (7): 24-27.

[6] 周荣生, 钱锦辉. 我国核燃料循环后端的挑战与建议 [J]. 中国核工业, 2013(10): 27-29.  
 ZHOU R S, QIAN J H. Challenges and recommendations for China's nuclear spent fuel [J]. China Nuclear Industry, 2013 (10): 27-29.

[7] 叶国安, 蒋云清. 我国核燃料后处理技术的现状与发展 [J]. 中国核工业, 2015(12): 26-30.  
 YE G A, JIANG Y Q. Present situation and development of nuclear spent fuel technology in China [J]. China Nuclear Industry, 2015(12): 26-30.

[8] 佚名. 我国首个国家级核技术产业园开工乏燃料后处理产业化启幕 [EB/OL]. [2015-08-25]. <http://news.emca.cn/n/20150825095350.html>.

[9] 国防科工局. 我国核电站乏燃料安全管理有保障 [EB/OL]. [2017-01-22]. <http://www.cec.org.cn/xinwenpingxi/2017-01-23/164140.html>.

[10] 佚名. 万吨核反应堆乏燃料为啥成了烫手山芋 [N/OL]. 2016-10-16 (1). <http://news.cctv.com/2016/10/16/AR-TiuRwJXkr1su2f0AW72VIB161016.shtml>.

[11] 汪海, 董明炎. 乏燃料运输容器研究进展 [J]. 机械工程师, 2015(12): 65-69.  
 WANG H, TONG M Y. Research progress of spent fuel transport vessel [J]. Mechanical Engineer, 2015(12): 65-69.

(责任编辑 高春萌)

# 广 告

- 中国能建广东院签约亚洲首个燃煤电厂多线程国际捕集测试平台项目 ..... 封二
- 广东国粤韶关综合利用发电新建项目 1 号机组顺利通过 168 小时满负荷试运行 ..... 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 ..... 封四