

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.002

上海发展核燃料循环后端产业的路径

顾银祥

(上海市核电办公室, 上海 200031)

摘要: 为更好地推动中国核电事业的发展, 消除民众对核废料的担忧, 完善上海核电产业链, 介绍了核废料的产生和
处理方法, 分析了国内外核燃料循环后端产业的特点、市场空间和发展态势, 以及上海市发展核燃料循环后端产业的
优势和不足, 提出了上海市发展核燃料循环后端产业的重要途径、重点产品以及相关政策建议, 对引导上海相关企业
进行合理规划和科研开发有一定的借鉴意义。

关键词: 产业发展; 核废料; 核燃料循环

中图分类号: TL249

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)03-0007-08

Roadmap of Nuclear Fuel Cycle Back-end Industry for Shanghai in China

GU Yinxiang

(Shanghai Municipal Nuclear Power Office, shanghai 200031, China)

Abstract: In order to better promote the development of China nuclear power industry, eliminate the public concerns on nuclear spent fuel, and extend the Shanghai nuclear industry chain, this paper introduces the generation of the spent fuel and the way of spent fuel treatment, analyzes the characteristics, market space and development trend of the nuclear fuel cycle back-end industry at home and abroad, and the advantages and disadvantages for Shanghai to develop the industry, and gives suggestions and advices on some important ways, key products and related policies for Shanghai to develop the industry, which is meaningful for the Shanghai nuclear related enterprises to plan rationally and conduct research and development.

Key words: industry development; nuclear spent fuel; nuclear fuel cycle

中国作为最大的发展中国家, 需要核电来提供长期、安全、清洁、可持续的能源, 实现能源结构优化和民族伟大复兴。当前, 社会上对核废料的处理非常关注, 连续发生的江门、连云港事件说明了普及核知识的重要性, 如何尽快提高核废料的能力, 妥善处理反应堆的核废料, 保证子孙后代美丽家园的安全, 驱散民众头上的疑云, 便成为决定中国未来核能发展道路的重要因素。

1 核废料的产生与核废料处理方法

广义上的核废料包括核燃料在上下游过程中产生的所有放射性废物。狭义上则专指核电站烧剩的

废料, 也称为乏燃料。乏燃料并不是“无用的废物”反而浑身是宝, 但同时它又充满危险, 如不善加处理, 会造成核燃料资源浪费和辐射污染。从核电站卸出的乏燃料会暂时放置于反应堆场址的水池内冷却一段时间, 在合适时候运至集中场址, 进行处理或处置。

从燃料利用率方面来看, 目前的裂变堆主要利用天然铀中仅占 0.7% 的²³⁵U 作为燃料, 而占绝大多数的²³⁸U 却无法有效利用, 综合 U 资源的利用率还不到 1%。据世界能源组织估计, 按目前反应堆对核燃料的消耗速度, U 在地球上的储量大约只够使用 200 年。无论是从安全性还是经济性角度考虑, 反应堆产生的这些核废料, 尤其是乏燃料, 必须得到妥善的处理。具体方法可以总结为以下四个方面: (1) 回收和纯化没有用完或尚未转化的核燃料; (2) 提取和纯化新生成的核燃料; (3) 提取有

收稿日期: 2017-07-19

作者简介: 顾银祥(1970), 男, 江苏南通人, 同济大学工商管理硕士, 主要从事核电产业发展和项目管理工作(e-mail) gyx180@163.com。

用的裂变产物；(4)对最终放射性废物进行安全处置。

乏燃料后处理对放射性废物最小化具有重要意义。首先,经过后处理后,只剩下极少数放射性废物,大大地减少了高放废物的数量。乏燃料若直接进行深地质处置,其体积是 $2.0\text{ m}^3/\text{tU}$,而经后处理提取U和Pu后,需地质处置的废物体积低于 $0.5\text{ m}^3/\text{tU}$,减容效果明显。其次,在后处理过程中或之后,采用分离-嬗变技术,可将长寿命核素转变成短寿命核素,有效地降低其放射性的长期危害^[1]。

2 核废料的分类

除了核电站正常运行产生的废水、废气外,放射性废物还产自上游的采矿、精炼、燃料制造与下游的核废料,核相关设施的退役等过程,甚至连科研活动所产生的放射性废物,比如实验室的手套衣服、清洗污水。

我国的放射性废物并不主要来源于核电站。据清华大学核能研究设计院统计:我国民用核技术产生的废料累计约 $1 \times 10^4\text{ m}^3$,研究开发产生的废料大概在 $5\,000\text{ m}^3$ 左右,军工生产遗留下的核废料大约有几万立方米,核应用产生的放射源有上万枚。另外,铀矿开采时产生的含放射性物质的废矿石有几千万吨,另产生核矿渣几千万吨。上述数据,就是目前中国整个核废料存量的明细账,可以看出核电站的核废料存量比重较低,主要原因是核电站在运行过程中能及时处置部分核废料。

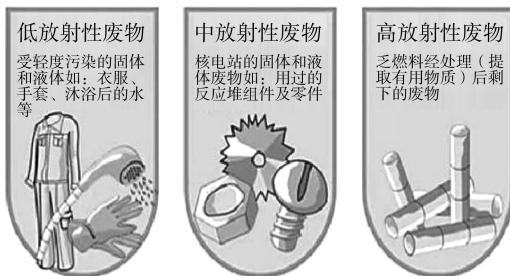


图1 放射性废物的分类

Fig. 1 Classification of radioactive wastes

与之相对,一座同样功率的火电站,一年烧煤约 $3.5 \times 10^6\text{ t}$,其中至少含有 5 t 天然U。虽然火电站排放烟尘绝大多数被过滤系统捕获,但逃逸到环境中的放射性核素辐射强度依然会导致这样一座火电站的辐射强度比核电站强50倍(数据源自郝卿

《核废料处理方法及管理策略研究》^[2])。

根据其放射性强度,核废料可以分为高中低三档。不同国家有不同标准,如图2所示,实际的核废料的质量比重里绝大部分都是中低放废物,而最需要关注的高放废物占3%,绝大多数源于乏燃料。所有的放射性废物都会根据其化学物理性质、放射性水平不同进行严格处理,保证所有排出物质对公众成员照射所造成的剂量值满足安全标准^[3-4]。

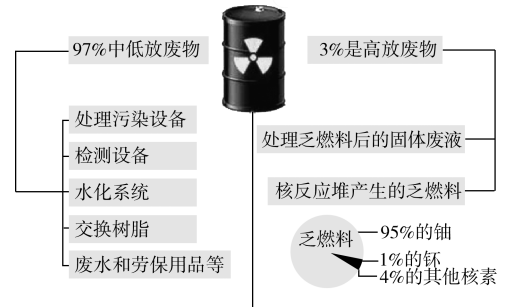


图2 典型核废料的组成部分

Fig. 2 Composition of typical nuclear spent fuel

1) 废气一般为中低放射性,可以暂时贮存让其自发衰变,或者采用活性炭过滤等方法处理并达标,其放射性已经低于大自然本底,可直接排放到大气环境中。

2) 中低放废液可采用过滤、离子交换减小体积,并分离为可直接排放的净化液和需要封存的浓缩液。

3) 中低放固体和浓缩液需要打包封存,通过稳定固化处理(沥青化或水泥化)后浅层掩埋于地表。

4) 高放废物和中低放处理残余物则必须经过最严格的固化处理(玻璃化或陶瓷化)后封存深埋于地底。

各种放射性废物的处理流程如图3所示。

最终将处理产物固化的好处有很多,包括方便储存运输、利于抗震抗压以防止接触地下水源造成核污染扩散并屏蔽核废物的辐射、易于导出核废物衰变产生的热量等。

3 发展核燃料循环后端产业的重要意义

大家知道,动力堆燃料循环方法有两种:一种是不进行后处理的开路循环模式(open fuel cycle);另一种是进行后处理的闭式循环模式(closed fuel cycle)。开路循环模式不进行后处理,乏燃料从反应堆卸出后经过中间储存和包装之后直接进行地质处置。

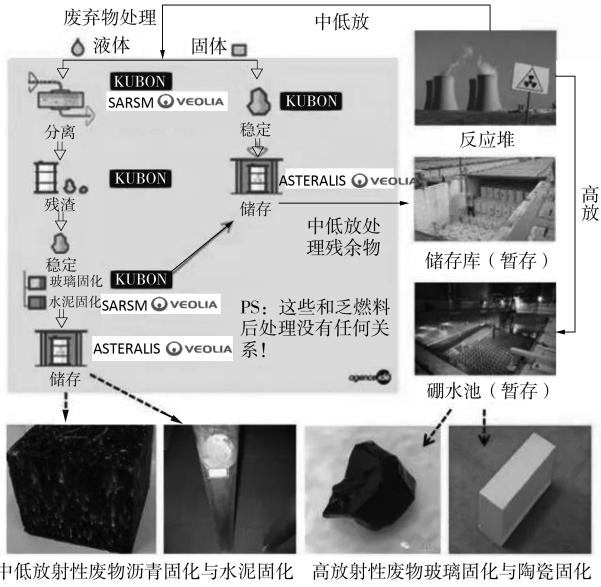


图 3 各种放射性废物的处理流程

Fig. 3 Flow chart of various radioactive wastes treatment

由于燃料循环只通过反应堆一次，U、Pu 不回收重复使用，故亦称“一次通过方式”，如图 4 所示。

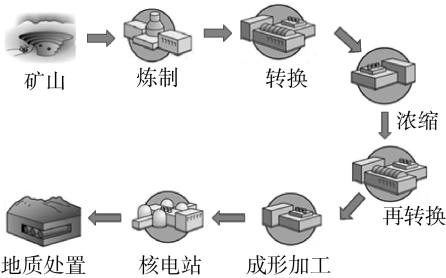


图 4 “一次通过式”核燃料循环示意图

Fig. 4 Diagram of “one cycle” nuclear fuel cycle

尽管按照目前的天然 U 价格水平，“一次通过”循环的经济性有可能略优于闭式循环，但从核能可持续发展的角度出发，为了充分利用 U 资源和减少核废物体积及其长期毒性，核燃料闭式循环是必由之路。目前世界上选择核燃料“一次通过”方式的国家有瑞典、芬兰、加拿大和西班牙等。美国多年来主要基于核不扩散的政治考虑，1980 年代后曾一直积极推动“一次通过”循环方式，2006 年后美国也正式宣布采取闭式燃料循环方式。采取核燃料闭式循环方式的国家有法国、英国、俄罗斯、日本、印度和中国等^[5-10]。可以说，全世界主要的核电国家均走核燃料闭式循环之路。还有不少国家尚未确定核燃料循环的技术路线，对核电站乏燃料目

前采取暂时储存的做法^[11-12]。此外，对于一些核电规模较小的国家，没有必要在其国内进行核燃料再循环，可以通过国际合作的方式实现核燃料再循环。

闭式核燃料循环是指乏燃料经过分离处理，将裂变产物分离除去，并将回收得到的铀和钚重新制成燃料元件返回反应堆复用，因此闭式核燃料循环的核心环节是乏燃料后处理。

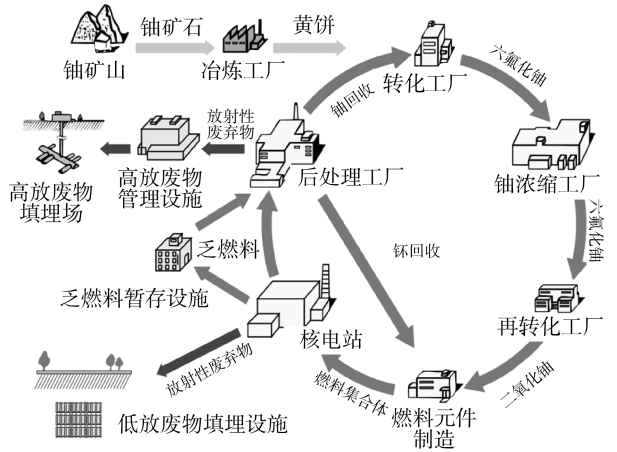


图 5 闭式核燃料循环示意图

Fig. 5 Diagram of closed fuel cycle

根据国家核电中长期发展规划(2005—2020)，我国将坚持闭式核燃料循环的技术路线，对乏燃料进行后处理，后处理中试厂于 2011 年开始运行。由于中国尚未建立起工业规模的后处理厂，核电站卸出的乏燃料暂存于核电站的贮存设施中。最近几年，国家正在积极部署商用后处理厂的建设，以保证核电的长期可持续发展。

3.1 近年来核燃料循环全球化的进程非常显著

亚洲不仅成为动力堆的市场，而且也成了核燃料与核燃料循环有关的设备和服务的市场。包括前苏联和东欧各国在内的一些国家现在已成为世界范围内的核燃料循环市场的积极参与者。随着核燃料循环服务新供应商的出现，核燃料循环市场的相互影响变得越来越复杂。例如，在核燃料元件制造方面，其市场越来越开放，反映了贸易和电力的全球自由化。

3.2 核燃料循环后端市场是一个千亿级的大市场

截至 2016 年 7 月，全球在运核电机组共 439 台，总装机容量 380 GW，按照当前核电装机规模，每年将产生约 1 万 t 乏燃料。截至 2013 年 12 月，全球乏燃料总量已达到约 37 万 500 t，其中约 25 万

3 700 t 乏燃料贮存在反应堆旁或离堆贮存, 约 11 万 2 800 t 乏燃料(略低于总量的三分之一)进行了后处理。

按照我国《核电中长期发展规划》, 我国核电在运行发电量 2020 年达到 5.8 GW, 在建 3.0 GW; 预计到 2025 年在运行 9.0 GW, 在建(3.0~4.0) GW; 到 2030 年在运行超过 12 GW。随着我国核电事业的快速发展, 乏燃料的贮存面临巨大的挑战, 因此乏燃料后处理就具有巨大的市场潜力。根据现行新增核电机组情况测算, 到 2020 年我国乏燃料累计存量将达到 9 000 t 左右, 且当年乏燃料的产量将达到约 1 100 t。按照国际上后处理费用 800~1 000 美元/kg 的标准, 预计我国 2020 年乏燃料后处理市场空间总计将达到(500~700)亿元。而一座 100 MW 的核电站一年产生 20 m³ 中放废物、140 m³ 低放废物和 200 m³ 非放射性废料。我国核电机组运行以来产生的中低放废物累计约 1.3×10⁴ m³, 预计到 2020 年累计将达到 3×10⁴ m³。参照美国每单位体积征收(3~5)万美元的放射性废物处理费用标准, 中国在 2020 年中低放废物处置市场规模可达(60~100)亿元, 在 2025 年可达(120~200)亿元。此外, 800 t 和 200 t 两座商用后处理厂的建设投资也在 1 500 亿元左右。据此测算, “十三五”期间后处理产业链整体市场空间总计达到千亿级。

3.3 解决迫在眉睫的后端需求

我国的《放射性废物管理规定》第十二条中规定, 中、低放固体废物的贮存期一般不宜超过 5 年, 应适时对废物进行相应的处理、整备或处置。该《规定》第十四条中还规定: 通常中、低放废物的隔离期不应少于 300 年; 中、低放固体废物应按“区域处置”的方针实施处置。

目前, 我国商业压水堆所产生的乏燃料有两种贮存方式, 一是放置于核电站区域内的乏燃料水池, 所谓在堆贮存, 在堆贮存时间一般是 10~20 年; 在堆贮存期满后, 乏燃料要运到位于甘肃的中核四〇四有限公司乏燃料水池, 所谓离堆贮存, 对乏燃料进行集中贮存并实施统一管理。当乏燃料水池的贮存能力接近饱满或乏燃料在水池中的贮存达到一定年限时, 乏燃料将被转移到干式容器中运往长期贮存场所或后处理厂。

在核电大发展背景下, 我国核电站卸出的乏燃料数量在不断增长, 大部分核电站的在堆贮存水池

容量已经超负荷(中国目前是按其可以存储乏燃料 10 年设计), 我国核电站运行已近 30 年, 乏燃料贮存设施已累积了大量乏燃料, 大亚湾核电站乏燃料贮存设施已经达到贮存上限, 田湾核电站乏燃料贮存设施也已接近饱和。已经建成的离堆乏燃料湿法储存设施也已饱和。目前, 四〇四原有的 500 t 乏燃料水池已经满容, 无法再接纳新的乏燃料。正在新建的一个 800 t 水池容量也有限, 按照我国商用核电站的用量, 这个水池也将在 2018 年满容。

除了贮存的需求外, 运输方面也面临着挑战。我国在 2003 年完成了核电站乏燃料的首次运输, 目前只有大亚湾核电站的乏燃料实现了外运。从广东到甘肃, 行程 3 700 km 左右, 受气候等影响, 每年只能进行两次运输, 并且是采取公路运输方式。“幅员辽阔”这一国土特点成为乏燃料运输中要克服的巨大障碍。此外, 运输容器、运输方式等也是乏燃料运输中的至关重要的因素, 急需建设一套先进的、综合的、多模式的乏燃料运输体系。

现实问题是, 我国核电站最集中的地区在沿海, 而乏燃料后处理项目的选址地并不一定是核电站所在地, 项目选址地的政府只有义务没有利益, 误以为后处理是“核垃圾处理”, 只有危害和风险, 因此不情愿接纳, 导致后处理项目落地存在极大困难。不接受外省废物, 已经成了一些地方建设废物处置场的前提条件。国家原计划建设西南、西北、华东、华南、北方五个区域处置场, 目前只建成了西北处置场, 且至今尚未建成具有一定处理规模的乏燃料商用后处理厂^[13]。乏燃料处理工厂的建设已经迫在眉睫。但无论是自主技术还是中法合作, 乏燃料后处理大厂投资强度均超过普通核电站, 建设周期超过 10 年, 投资额更是动辄数千亿元。

从表 1 可知, 目前全球大部分的乏燃料贮存在水池中, 随着全球核电装机总量和乏燃料累积量的不断增加, 这部分乏燃料的运输和贮存势在必行, 将直接带动乏燃料后处理产业的增长。

后处理产业链的快速发展和大力投入将成为第二轮核电发展高峰的显著特征, 其中高放核废料处理难度大, 技术含量高, 附加值高, 将成为核废料处置的重头戏。而中低放核废料处置虽然附加值较低, 但随着中国核电站运行数量的大幅提升, 中低放废物总量增长加速, 未来新建核电站中低放废物处置中心已成为标配。目前大亚湾和秦山基地正在

表1 国内乏燃料贮存需求预测表

Tab. 1 Forecasted statement of national spent fuel storage demand

年份	当年乏燃料 产生量/t	累积乏燃料 产生量/t	当年乏燃料 离堆量/t	累积乏燃料 离堆量/t	当年乏燃料 外运量/t	累积乏燃料 外运量/t
2015	665	3 522	200	600	188	456
2020	1 298	8 718	319	2 023	262	1 594
2025	1 923	16 764	876	5 236	819	4 522
2030	2 637	28 285	1 605	11 559	1 503	10 560

进行相应规划。

4 上海发展核燃料循环后端产业的路径

上海是国内集核工程设计、核设备制造和核工程人才培养于一体的地区。目前上海核电产业已基本形成了核电研发设计、工程承包、核电材料、设备制造、测试认证、运行服务及人才培养等诸多环节的较完整的核电产业链。具有较丰富的人才资源；上海的区位优势和金融中心等都为上海发展核电产业创造了良好的环境。上海市核电办公室承担着行业规划、项目管理及核电科普宣传等职能，近年来也密切关注着核燃料循环后端产业发展对上海核电产业带来的机遇与挑战。上海市将从政府层面联合重点企业，积极和国家科工局以及中核集团建立战略合作关系，积极参与到在乏燃料后处理设备研发领域和设备国产化领域，积极参与到商用后处理厂项目建设中去。主要有以下几点考虑：

4.1 跟踪后处理产业政策动态，制订后处理产业发展规划

十八大以来，党中央、国务院采取多项举措稳增长、调结构，大力支持高科技产业发展，推动国家经济转型升级。关于核燃料循环项目的政策和规划不断明确和具体。在政策层面，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^[14]。乏燃料后处理技术列入“清洁高效能源技术”，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，这说明在政策层面，乏燃料后处理已经明确写入“十三五”规划纲要，上升至国家战略层面，有助于产业链崛起。上海市相关政府部门和企业目前正积极关注和学习国家后处理的相关政策，及时关注后处理产业最新发展动态，不断探索上海市为我国推进后处理产业做贡献的路

径，积极加入到乏燃料后处理产业中去。

上海已经将发展乏燃料后处理产业纳入上海核电十三五规划，重点聚焦乏燃料贮存格架、干式贮存容器、乏燃料运输容器、玻璃固化容器、焚烧炉、相关泵阀、电气控制设备、化工容器，后处理材料等领域的产品研发和制造。通过举办国际核燃料循环论坛，交流最新技术成果和产业动态，推动产业对接；以规划引领，做好顶层设计。

4.2 充分发挥高校、科研院所集中优势，提前布局相关技术研究

上海核工程研究设计院、上海交通大学、华东理工大学、上海材料研究所、上海硅酸盐研究所、中科院上海应用物理研究所等单位在乏燃料后处理技术方面都有不同程度介入，有的还已经作为重点学科和重点科研项目在推进。例如，上海核工程研究设计院从秦山核电开始，就深入开展相关研究，成功为秦山三期设计了乏燃料干式贮存系统，目前正在重点开展三代核电燃料干式系统关键设备构设计和安全分析，形成了一套可行的压水堆乏燃料干式系统方案。上海应用物理研究所提出钍基熔盐堆(TMSR)燃料处理流程，采用在线-离线结合、干法-水法互补原则进行技术攻关。建立了高温氟化反应实验装置，确定了梯度冷凝的产物收集和铀氟化挥发过程中红外在线分析监测技术，铀回收率超过95%；并进行千克级FLiNaK减压蒸馏实验验证，还初步验证了熔盐中电解分离铀与稀土的可行性。上海交通大学核燃料循环研究室主要从事先进的乏燃料后处理技术、高放废液分离、铀系及裂变产物元素的化学行为、放射性核素分离用高性能吸附材料研制等研究工作。研究领域包括围绕快堆燃料循环体系的先进后处理技术研究、长寿命次铀系及核裂变产物核素的分离研究、新型吸附分离材料研发、调控离子价态的高效电解装置研发、放射能污染水处理技术及装置的研发、先进医疗用放射性

核素诊断及治疗药物的研制等。研究室于2013年与上海市计量测试技术研究院共建了“放射化学联合实验室”，具备从事放射化学实验的国家丙级实验室资质。

4.3 发挥重点核电骨干企业作用，积极参与后处理设备国产化

一般认为，后处理厂的设备可以分为以下三类：(1) 难度高、需求量小的关键技术设备：乏燃料剪切机、远程操控设备和玻璃固化设备等；(2) 难度相对较低、价值高、需求量大的：乏燃料贮存容器和储运容器；(3) 国内已经具备或者短期内可以通过研发具备设计制造能力的核级常规设备。

后处理技术是一项仅有法国、英国、日本、俄罗斯等少数国家掌握的高新技术，后处理厂内有多种关键设备比如剪切机、远程操控技术和设备、以及玻璃固化设备有的我国尚未掌握制造技术，有的目前尚处于研发阶段，这些将成为国家鼓励各大科研院所重点攻关、立项研发的项目。与此同时，后处理厂作为化工厂也需要大量的核级化工设备、自动化仪控设备和放射性检测设备等设备，这些设备是国内先进制造企业已经具备或者短期内可以通过技术引进或者研发获取设计制造能力的常规设备。因此，积极参与国外先进技术的消化吸收和进入后处理厂常规设备的设计制造市场是上海市进入后处理产业的两个重要途径。

后处理厂关键技术设备的特点是研发难度大，耗时长，资金和人力成本高，因此基本都是国家级别的重大专项才足以支撑相关的研发项目，因此在科研方面，上海将组织具有相关设备研发经验的单位与中核集团下属的研究单位建立合作，共同推进现有项目的进展。

乏燃料贮存容器和储运容器设计制造是一个系统工程，包括容器设计、试验、制造、以及相关法规、标准的制定。乏燃料的贮存和运输不仅仅需要考虑由辐射、热量引起的安全问题，还要考虑临界安全问题。乏燃料储运罐的设计和制造必须满足国家和国际原子能机构的强制标准。其关键技术的突破需要大量的投入，如中子吸收材料的制备、厚板的制造、灌铅和焊接工艺等。现在有能力设计、制造大型乏燃料贮存运输容器的国家有美国、德国、法国、英国、俄罗斯、日本、韩国等。到目前为止，中国尚无设计、制造商用核电站乏燃料运输容

器的能力，但是国内企业和科研院所已经积了一些经验。可以考虑与国外相关公司进行合作或者购买其现有技术，提高研发起点，加快产业化速度。

目前上海阿波罗机械制造有限公司已经同法国阿海珐 TN 公司签订合作协议，引进法国的技术制造乏燃料贮存容器和储运容器，正在进行样机制造，进展顺利。此外，上海电气核电集团公司和上海森松集团等单位已经开展了长期的调研并努力进入相关市场领域。在产业化方面，上海电气入股的青岛东卡环保工程技术有限公司已经开始了从国外公司引进以上几种设备和技术的商务谈判，上海电气结合自身强大的设计制造能力，积极参与推进这几种关键设备的国产化。

有关常规设备方面，根据国家核安全局发布的《民用核安全设备目录》(2016年修订)^[15]，核燃料循环后处长专用核安全设备的清单如表2所示。

表2 核燃料循环设施后处理厂专用核安全设备
Tab. 2 Specialized nuclear safety equipment in nuclear fuel cycle facility in reprocessing plant

设备	分类	装置
核安全(1E级) 电气设备	传感器	吹气装置
		临界事故报警仪
核安全机械设备	储罐	反应炉(器)
		萃取设备
		产品贮存容器
	热交换器	贮槽
		后处理首端专用设备
		箱室设备
		蒸发器
泵	运输高仿溶液的泵	
阀门	穿地阀	

除此之外，国家环境保护部核与辐射安全中心依据国家相关法律、法规、国家标准和相关技术文件等，进一步编制了《后处理厂核安全设备清单》，如表3所示。

针对以上表格中列出的设备，上海市核电办建议相关的企业、设计院和研究机构等强强联合，依托现有的设计、制造、加工基础，发挥各自的优势，进一步发挥上海市在后处理领域尤其是装备制造方面的竞争力，积极竞标获得后处理厂常规设备的设计制造资格，在后处理常规装备制造领域争取一定的市场占有率。

表 3 后处理厂核安全设备清单

Tab. 3 List of nuclear safety equipment in reprocessing plant

种类	类别	设备举例
核安全机械设 备	储罐	反应炉(器)：草酸铀焙烧炉、玻璃固话炉、草酸铀沉淀反应器
		萃取设备：共去污萃取设备、铀钍分离萃取设备、铀萃取设备、铀反萃取设备
		产品贮存容器：二氧化铀产品贮存容器、高放玻璃固化体贮存容器
		贮槽：首端系统贮槽(溶解液贮槽、残渣槽(离心机冲渣水)、清液槽)、共去污系统贮槽、铀钍系统贮槽(包括铀尾端)、其他高放溶液贮槽、临界安全贮槽、核材料衡算槽
		后处理首端专用设备：乏燃料溶解器、沉降离心机
热交换器	泵	箱室设备：热室(设备室)壳体、铀钍尾端工作箱
		蒸发器：高放废液蒸发器、中放废液蒸发器、铀(钍)溶液蒸发器
		运输高仿溶液的泵：蒸汽喷射泵、压空喷射器、空气提升器、可逆流体换向装置
阀门	穿地阀	
核安全电气设备	传感器*	吹气装置
		临界事故报警仪

注：* 传感器包括探测器和变送器。

4.4 积极参与发展后处理材料产业

由于后处理过程所处理的乏燃料的特殊性，对相关处理设备的选材，特别是核心设备如剪切机等选材，是整个后处理技术中的关键性问题，需要大量具有临界安全和辐射防护要求等特性的特种钢材和中子吸收材料等新材料。此外，放射性废物的处置设施也需要特定的材料，因此后处理产业中的材料市场将迎来巨大的发展空间。

比如在整个核燃料循环过程中，大量使用到不锈钢、耐蚀合金材料。此外，随着新型材料的发展，耐蚀性能更强的铌、锆、钛合金等逐步在替代低碳不锈钢。同时，具有控制乏燃料反应性功能的中子吸收材料也被大量使用。

通常后处理设备的选材采用超低碳不锈钢、含硼不锈钢、镍基合金、两元钛合金等。分品种来看，包括各种不锈钢无缝管、轧制钢板、锻制厚钢板、各种锻件及异型部件多种状态的产品，如表 4 所示。

目前上海已有宝钢特钢、上海材料研究所、上海硅酸盐所等单位正组织相关科研攻关，准备进入相关领域。

4.5 积极组织好产学研联合攻关

加强涉核相关企业之间的彼此联系，以及涉核企业与其他企业之间的联系，形成资源互相利用，技术互相渗透，彼此协调发展的局面。因为乏燃料后处理是一个交叉度极高的行业，所涉及到的领域包括化工、材料、装备、电控、交通运输等，很多技术性难题需要更多的企业参与协作攻关。同时，相关企业也应当加大与高校等的合作力度，将高校前沿性的科学研究成果应用到企业的工艺技术中，为今后后处理产业相关的信息化，智能化，远程控制以及高度自动化打下良好基础，更好地做到产学研相结合。

4.6 加强人才培养和高端人才引进规模

上海在乏燃料后处理领域基础相对薄弱，处于尝试进入和初期发展阶段，涉及后处理领域的科研人才较少，尤其缺少该领域的具有丰富经验的高端人才。首先，要加强人才培养机制，有针对性的支持一些有底蕴高校增开核相关专业，保证高端综合性人才源源不断的向该领域输送；其次，加强核专业相关的高端人才引进规模。就目前来说，乃至今后几年，国内的核技术和后处理研究都明显落后于西方发达国家，要尽快缩短与发达国家的差距，引进吸收再创新是唯一可行的捷径。要走通这一捷径，引进高端人才是核心。2010 年韦悦周教授归国后，作为学科带头人在上海交通大学核科学与工程学院建立了核燃料循环

表 4 后处理用特种钢材料

Tab. 4 Special steels used in reprocessing plant

分类	品种	牌号	用途
不锈钢无缝管、轧制钢板、锻制厚钢板、各种锻件及异型部件	镍基合金、钛合金	主要有 825 合金(N8825)、Ni-Cr-Mo-W 合金以及具有不同 Ni 含量的 Fe-20%Cr 合金；Ti-Ta 合金、Ti-Ta-Nb 合金、Cr-W-Si 的 Ni 基 RW 合金	格架、乏燃料溶解槽、酸回收蒸发器、加热盘管、元件溶解器(外壳)、硝酸回收器、嬗变加速器部件、储罐、压力管道、压力容器等
	不锈钢	Cr-Ni 不锈钢(0Cr18Ni10B)、超低碳 R-SUS310ULC 钢、SHS310EHP 钢、310 系钢种、309S 不锈钢(Cr-Ni)304L 奥氏体不锈钢等	

研究室, 搭建人才队伍, 建设了放射化学实验室并配备了较为齐全的先进实验设备, 经过几年的发展, 课题组先后承担并完成了多项国家自然科学基金委员会的科研项目^[4]。通过这一系列科研项目, 锤炼了科研人才队伍, 完善了实验方法, 积累了一批很有意义的成果。这些都为将来进一步开展深入的研究打下了良好的基础。

中国核燃料循环产业的发展还刚刚起步, 还有许多方面值得探索, 我们真诚地希望全国核电相关成员单位大力支持上海的工作, 一起携起手来, 通过共同努力为中国的核电事业作出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 佚名. 部分贮存设施达到上限, 核电乏燃料的“家”在哪里? [OL]. 中国环境报. [2016-08-23]. http://www.cenews.com.cn/sylm/zdtj/201608/t20160823_808480.htm.
- [2] 郝卿. 核废料处理方法及管理策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
HAO Q. Research on disposal methods and management strategy of nuclear fuel [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [3] 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.
ZHOU W Y. Progress and discussion on chemical separation technologies for nuclear fuel reprocessing abroad [J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(7): 1272-1288.
- [4] 韦悦周, 吴艳, 李辉波. 国家十二五重点图书出版规划项目: 最新核燃料循环 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 1-457.
WEI Y Z, WU Y, LI H B. Key books pressing project in China's 12th five-year plan period: the newest nuclear fuel cycle [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2015: 1-457.
- [5] 中国核科技信息与经济研究院. 法国核工业概况 [J]. 乏燃料管理及后处理, 2009(4): 52-59.
China Institute of Nuclear Information & Economics. France nuclear industry profile [J]. Spent Fuel Management and Reprocessing, 2009(4): 52-59.
- [6] 中国核科技信息与经济研究院. 英国核工业的发展 [J]. 乏燃料管理及后处理, 2009(2): 50-57.
China Institute of Nuclear Information & Economics. Britain nuclear industry development [J]. Spent Fuel Management and Reprocessing, 2009(2): 50-57.
- [7] 中核四〇四有限公司, 中国核科技信息与经济研究院. 动力堆乏燃料后处理厂状况与工艺调研报告(俄罗斯) [R]. 北京: 中国核科技信息与经济研究院, 2006.
The 404 Co., Ltd. of China National Nuclear Corporation, China Institute of Nuclear Information & Economics. Reprocessing plant status and process research report for power generating reactors(Russia) [R]. Beijing: China Institute of Nuclear Information & Economics, 2006.
- [8] 孙晓飞, 黄钟. 日本的乏燃料管理及后处理 [J]. 乏燃料及后处理, 2007(3): 17-23.
SUN X F, HUANG Z. Spent fuel management and reprocessing in Japan [J]. Spent Fuel and Reprocessing, 2007(3): 17-23.
- [9] 核能研究展望 NPRV. 印度乏燃料后处理: 目前的挑战和未来的计划 [N/OL]. 核能研究展望微信公众号: NPRV_World. [2016-06-28]. http://www.weixinnu.com/account/nprv_world.
- [10] 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. Status and development of China nuclear spent fuel reprocessing technology [J]. China Nuclear Industry, 2015(12): 26-30.
- [11] 中国核科技信息与经济研究院. 美国核工业的发展 [J]. 乏燃料管理及后处理, 2009(5): 38-48.
China Institute of Nuclear Information & Economics. American nuclear industry development [J]. Spent Fuel Management and Reprocessing, 2009(5): 38-48.
- [12] 中核四〇四有限公司. 中国核科技信息与经济研究院. 动力堆乏燃料后处理厂状况与工艺调研报告(德国) [R]. 北京: 中国核科技信息与经济研究院, 2006.
The 404 Co., Ltd. of China National Nuclear Corporation, China Institute of Nuclear Information & Economics. Reprocessing plant status and process research report for power generating reactors (German) [R]. Beijing: China Institute of Nuclear Information & Economics, 2006.
- [13] 郑文棠, 程小久. 我国低中放废物处置相关问题研究 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 75-82.
ZHENG W T, CHENG X J. Research on related problems of low and intermediate level radioactive waste disposal in China [J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 75-82.
- [14] 国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知: 国发[2016]43号 [EB/OL]. [2016-07-28]. http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gkjgh/201608/t20160810_127174.htm.
- [15] 国家核安全局. 关于发布《民用核安全设备目录(2016年修订)》及有关解释说明的通知: 国核安发[2016]79号 [EB/OL]. [2016-04-08]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201604/t201604_11_334991.htm.

(责任编辑: 郑文棠)