

中国工程院咨询项目

核燃料循环前段与后段技术发展战略研究项目组

# 核燃料循环前段与后段 技术发展战略研究

中国原子能出版社

中国工程院咨询项目

核燃料循环前段与后段技术发展战略研究项目组

# 核燃料循环前段与后段 技术发展战略研究



中国原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

核燃料循环前段与后段技术发展战略研究/潘自强  
等编著. —北京:中国原子能出版社,2013.1

ISBN 978-7-5022-5828-3

I. ①核… II. ①潘… III. ①核燃料-燃料循环-发  
展战略-研究 IV. ①TL249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 023154 号

## 核燃料循环前段与后段技术发展战略研究

---

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 孙凤春

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 12 字 数 300 千字

版 次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5828-3 定 价 56.00 元

---

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:[atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

# 总 目 录

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 1. 核燃料循环前段与后段技术发展战略研究              |       |
| ——综合报告 .....                       | (1)   |
| 2. 铀矿地质勘查、开采与提取技术研究                |       |
| ——铀矿采冶技术发展战略研究 .....               | (35)  |
| 3. 铀矿地质勘查、开采与提取技术研究                |       |
| ——铀矿地质勘查、开采与提取技术研究(国内铀矿地质勘查) ..... | (39)  |
| 4. 铀矿地质勘查、开采与提取技术研究                |       |
| ——铀矿地质勘查、开采与提取技术研究(国外部分) .....     | (43)  |
| 5. 铀转化与铀同位素分离技术研究                  |       |
| ——铀同位素分离技术战略研究 .....               | (67)  |
| 6. 铀转化与铀同位素分离技术研究                  |       |
| ——我国铀转化生产技术发展的战略研究(天然铀转化部分) .....  | (71)  |
| 7. 铀转化与铀同位素分离技术研究                  |       |
| ——我国铀转化生产技术发展的战略研究(贫铀处理部分) .....   | (75)  |
| 8. 核燃料元件材料及制造技术研究 .....            | (89)  |
| 9. 乏燃料后处理及再循环技术研究 .....            | (117) |
| 10. 放射性废物安全处理处置及分离嬗变技术研究 .....     | (145) |
| 11. 核燃料前段和后段技术政策研究 .....           | (175) |

中国工程院咨询项目

# 核燃料循环前段与后段 技术发展战略研究

——综合报告

# 《核燃料循环前段与后段 技术发展战略研究》

## 参加研究人员

项 目 顾 问:杜祥琬

项 目 负 责 人:潘自强

成 员:陈毓川 陈念念 李冠兴 朱永睿 郑健超  
钱皋韵 陈肇博 刘 华 林 森 徐玉明  
俞培根 黄国俊 李金英 李广长 郝东秦  
沈文权 赵志祥 李晓明 潘启龙 张伟星

综合报告执笔人:张伟星

项 目 办 公 室:张雅丽

# 目 录

|                                            |           |
|--------------------------------------------|-----------|
| 摘要                                         | 5         |
| <b>1 世界核燃料循环前段与后段技术基本状况</b>                | <b>8</b>  |
| 1.1 世界核燃料循环前段与后段技术的国家分布                    | 8         |
| 1.2 核燃料循环前段技术现状                            | 9         |
| 1.3 核燃料循环后段技术现状                            | 14        |
| 1.4 世界核燃料循环前段和后段技术发展方向与前景                  | 17        |
| <b>2 我国核燃料循环前段与后段技术现状及发展态势</b>             | <b>18</b> |
| 2.1 铀资源勘查与开发技术基本状况                         | 18        |
| 2.2 铀转化技术现状                                | 19        |
| 2.3 铀同位素分离技术现状                             | 20        |
| 2.4 核燃料元件技术现状                              | 20        |
| 2.5 乏燃料后处理技术现状                             | 21        |
| 2.6 放射性废物处理与处置现状                           | 21        |
| <b>3 我国核燃料循环发展共同关心的问题分析</b>                | <b>22</b> |
| 3.1 铀资源和天然铀供应问题                            | 22        |
| 3.2 MOX 燃料元件应用预测                           | 25        |
| 3.3 我国商用后处理技术开发与大厂建设问题                     | 26        |
| 3.4 快堆发展问题                                 | 26        |
| 3.5 放射性废物的处理和环境影响问题                        | 27        |
| <b>4 战略思路及规划目标</b>                         | <b>28</b> |
| 4.1 战略思路                                   | 28        |
| 4.2 战略重点和目标                                | 29        |
| <b>5 保障核燃料循环前段与后段技术发展的对策</b>               | <b>30</b> |
| 5.1 集中力量,解决核燃料循环前段与后段技术中的突出问题              | 30        |
| 5.2 统一规划建设与核事业发展相适应的核燃料循环体系                | 30        |
| 5.3 坚持“以我为主,中外合作”方针,走自主创新与积极引进相结合的发展<br>路子 | 31        |
| 5.4 理顺管理体制和机制,制定出台完善促进核燃料循环技术的政策体系         | 31        |
| 5.5 全面加大投入,突出重点支持,确保短期内有所突破                | 31        |
| 5.6 加大加速核科技人才培养,造就一批能突破关键技术的学术带头人          | 32        |

6 结论..... 32

6.1 核燃料循环前段与后段技术是我国核能发展的重要组成部分..... 32

6.2 核燃料循环技术与世界先进水平相比尚有较大差距..... 32

6.3 核燃料循环各个环节技术发展不平衡..... 33

6.4 铀资源供应的压力与希望共存,抓住机遇,就有可能不是我国核电规模发展  
不可克服的制约因素..... 33

6.5 加强核燃料循环技术创新是适应核电规模发展的关键..... 33

# 摘 要

核燃料循环是人类实现核裂变能应用的基础。以核燃料元件(组件)在核反应堆中应用为分界,包括铀矿勘查采冶、铀纯化转化、铀同位素分离和核燃料元件(组件)制造的技术过程称为核燃料循环的前段技术;核燃料从反应堆卸出后(乏燃料)的处理和处置技术过程称为核燃料循环的后段技术。

根据采取的核燃料循环后段技术,核燃料循环又分为闭式核燃料循环和“一次通过”式核燃料循环两种技术路线。闭式核燃料循环是指回收乏燃料中的铀、钚等易裂变材料以及可以利用的次锕系元素等物质,易裂变材料再加工制造成核燃料元件(组件),其他放射性核素作为废物最终处置;“一次通过”式核燃料循环是指将乏燃料作为放射性废物直接最终处置。

在目前广泛应用的热中子反应堆核电站的核燃料循环模式下,采用“一次通过”式核燃料循环,天然铀资源的利用率约为 0.6%;如果采用一次闭合循环,天然铀资源的利用率可以达到约 1%。在快中子增殖堆核电站的核燃料闭合循环模式下,铀资源的利用率可能提高 30~60 倍。

为了实现社会经济快速可持续发展,国家制定了《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》,提出了积极发展核电的战略目标。一个与核电发展需求相适应的核燃料循环技术和工业体系是保障核燃料可靠供应、提高资源利用率、实现放射性废物的安全管理、确保核能利用快速可持续发展的核心和关键。因此,系统研究和制定符合中国实际的核燃料循环前段与后段技术发展战略,对完成国家核电发展的战略目标具有重要意义。

## (1) 国外核燃料循环前段与后段技术发展概况

世界上拥有完整核燃料循环工业体系的国家有美国、俄罗斯、英国、法国、印度、日本。采取一次通过式核燃料循环技术路线的有瑞典、加拿大、西班牙。美国自里根时代起,积极推行一次通过式核燃料循环技术路线,但目前已决定今后对乏燃料进行后处理以便回收铀和钚,实现再循环利用。除我国以外,采取闭式循环技术路线的国家还有法国、英国、俄罗斯、日本和印度。

在铀资源勘查采冶方面,铀矿地质新理论不断完善,遥感、综合物化探和探矿新技术的应用使勘查技术不断进步,铀矿勘查向潜伏深埋藏大型铀矿发展。先进堆浸和地浸技术使低品位、大矿量的硬岩和砂岩型铀矿得到经济开采,资源的综合回收率不断提高。

在铀浓缩领域,离心法是发展的主要方向。离心法的主要设备离心机分为超临界离心机和亚临界离心机两种类型,尽管单机分离能力相差悬殊,工业化应用的综合性能却难分伯仲。目前离心法的生产能力占 60%。激光法还处在研发阶段。

核燃料元件向长换料周期、高燃耗方向发展,先进结构材料和满足反应性控制要求的高性能芯块设计制造技术成为技术攻关的重点;继 MOX 燃料成功使用后,围绕快堆燃料循环的先进铀钚混合燃料也在研发中。

乏燃料后处理技术向适应处理燃耗深、比活度高、钚含量高的乏燃料方向发展,提出了改进的水法后处理流程。全分离流程也进入热验证阶段,与快堆相应的后处理技术,如干法后处理工艺流程等也取得了一定进展。为防止核扩散目的,一些国家还研发了铀钚共处理流程。

高放废物的深地质处置研究不断深化,为了减小高放废物数量和缩短深地质处置废物的管理时间,分离-嬗变等技术也在研发中。

## (2) 我国核燃料循环前段与后段技术现状

经过半个多世纪的发展,我国建立了较为完善的从铀矿地质勘查、铀矿采冶、铀转化、铀浓缩和核燃料元件制造技术体系和工业体系,基本满足了核电发展的需要。

目前我国已经形成了具有特点的铀矿成矿理论,掌握了综合铀矿勘查技术方法和手段。铀矿采冶掌握了常规水冶、地浸、堆浸和原地爆破浸出等工艺,根据不同铀矿类型采用多种技术方法,资源综合回收率得到进一步提高。

天然铀转化工艺采用的两级串联逆流流化床和立式氟化炉的氢氟化和氟化工艺,均具有独创性;研制成功 10 000 A 中温电解槽。

完成了铀同位素分离由扩散法向离心法的过渡。

通过技术引进、吸收和再创新,我国已实现高性能燃料元件的国产化,产品性能达到国际先进水平。自主品牌高性能钎合金的研制进入工程化应用研究阶段。MOX 燃料元件研发也已经起步。

自主设计建造的我国第一座动力堆乏燃料后处理中间试验工厂已经过冷铀调试,成功地完成了热试。自主研发的先进无盐二循环工艺流程经实验室热试验之后将在中试厂得到工程验证。次锕系元素等的分离已完成实验室研究,温实验正在进行中。

我国在中、低放废物相对集中的地区,陆续建设了国家中、低放废物处置场。在甘肃北山地区开展了对高放废物处置的深部地质环境研究和场址评价研究,初步掌握了场址特性评价方法。

## (3) 需要重点关注的问题

面对国家核电发展的迫切需求,当前我国在核燃料循环技术方面存在几个方面的突出问题:

一是铀资源保障的问题。总体看,铀资源供应面临很大压力,我国国土面积铀矿勘查研究程度较低,将近 50% 可勘查面积接近空白,而目前每年铀矿勘查投入严重不足,针对大型超大型铀矿,特别是地理条件复杂地区和深部隐伏铀矿的勘查技术能力有很大不足;探明的铀矿床大多具有规模偏小、品位偏低、多金属伴生、成分复杂等特点,需通过技术创新降低生产成本、提高生产效率、减少环境污染,将部分非经济的铀矿床转变成经济可采铀矿,提高我国可利用战略铀资源储量。

二是铀纯化、转化、浓缩能力问题。铀转化方面,必须在现有技术的基础上要全面掌握年单线 3 000 t、6 000 t 生产能力的工艺技术。铀浓缩方面,急需在大型商用铀离心浓缩厂级联设计和新型离心机设计制造技术等方面取得突破,确保分离功供应。

三是尚不具备自主品牌的高性能核燃料元件。我国的先进核燃料元件(组件)一直未能形成自主的品牌,在设计、制造、辐照考验、热室检验等方面一直未能形成系统全面的研究试验能力;MOX 核燃料元件的研发基本上处于基础研究阶段,严重制约了快堆技术的发展。虽然通过引进技术实现了高性能核燃料元件制造的国产化,但目前主要结构材料的供应全

部依赖国外,对我国的核能战略安全构成巨大风险。

四是乏燃料后处理技术相对落后,长期以来技术研发投入很少,严重制约我国闭合核燃料循环体系建设,快堆和高燃耗压水堆乏燃料后处理的研究试验手段尚属空白。

五是高放废物的最终处置停留在基础研究阶段。虽然经过多年的技术开发,在放射性废物处理技术等方面取得较大成绩,确保了我国军工废物的安全管理,但从废物最小化的管理要求看,与国际先进水平存在巨大差距,远远不能满足未来核电发展的要求。高放废物处理处置技术研究开发能力尤其不足,相应的研究试验设施匮乏。

#### (4) 保障核燃料循环前段与后段技术发展的对策及建议

为了满足国家核电发展的需求,必须建立与核电发展相适应的核燃料循环技术体系和产业体系。我们建议:

1) 充分认识核燃料循环前段、后段技术在核能发展中的战略地位,构建完善的技术创新体系。

结合铀资源勘查、采冶、铀纯化转化、铀浓缩、核燃料元件、后处理、放射性废物管理等环节技术发展的需求,整合国内现有的研究、设计、生产、高校等单位的研发力量,构筑高水平的核燃料循环工程技术研发平台。

统筹规划,系统布局,加大投入,改变科研工作时断时续的局面,对核燃料循环前段、后段主要技术领域前瞻性、基础性的研究给予持续的支持,夯实我国核燃料循环领域技术发展的基础。

2) 围绕薄弱环节,实施重大科技工程,突破制约核能产业发展的技术瓶颈。

目前,核燃料元件、MOX 元件、乏燃料后处理、高放废物处理处置技术是制约核电发展的技术瓶颈。国家已经将乏燃料后处理列入重大科技专项,应加强自主品牌的高性能核燃料元件和 MOX 燃料元件研发力度,重点突破锆材、核燃料元件设计、加工制造、性能检验的核心技术,牢牢把握核电发展的主动权。加强高放废物地质处置技术研发,2020 年左右建成地下实验室。

3) 开源节流,通过加大投入和技术进步最大限度地开发和利用铀资源。

重点针对大型超大型铀矿以及深埋藏隐伏铀矿床勘查的需求,加强地质研究,摸清找矿规律,建立和完善找矿模式。配套完善航测遥感、物化探和分析测试等技术能力,全面提升我国铀矿资源评价与勘查的能力和水平。建设铀矿冶工程技术研究中心,提高我国先进的地浸堆浸、水冶工艺发展的能力和水平,降低生产成本,使目前尚属非经济的铀矿资源变成经济可采的铀资源。

加快快堆利用贫铀的工程化应用,研究利用堆后铀的可行模式,发展重水堆利用堆后铀的应用开发等相关技术。

4) 大力推进废物最小化,确保核环境安全。

将废物最小化的理念融入核燃料循环前段、后段的各个工艺环节,以废物最小化的要求研究新工艺、新技术。特别是在铀矿冶、放射性废物处理等环节,要通过技术进步实现循环经济 and 资源的综合利用,实现废物最小化,提高核燃料循环的经济性,确保核环境安全。

总之,要理顺管理体制和机制,制定完善的促进核燃料循环技术的政策体系,坚定不移地推进核燃料循环技术领域的科技创新,确保短期发展有所突破,长期发展有所储备,为我国核电可持续发展奠定坚实的技术基础。

最近,世界各国首脑聚集哥本哈根,讨论应对温室气体造成的全球气候变化问题,建立一个经济可持续发展的低碳社会已经成为世界各国人民共同关注的焦点。我国作为一个负责任的发展中国家,温家宝总理代表中国政府郑重承诺到 2020 年,我国国内单位生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45% 的目标。

为了达到上述目标,我国正在采取包括积极推进核电发展在内的一系列举措,这是我国核能发展的光荣使命和良好机遇,也是核能利用的神圣义务和严峻挑战。

众所周知,核电是安全的、清洁的、经济的、可持续发展的能源,因此国务院已于 2007 年 10 月正式公布了《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》。

为适应我国核电快速发展的需求,核燃料循环产业及其技术也应有相应发展。核燃料循环分为闭式燃料循环和“一次通过”式燃料循环,前者包括乏燃料的中间储存、乏燃料的后处理、放射性废物的处理和最终处置等过程;后者不进行乏燃料的后处理,只包括乏燃料的中间储存,然后通过包装就进行深地层最终处置。闭式燃料循环又包括热堆的闭式燃料循环和快堆的闭式燃料循环。闭式燃料循环包括三大部分:一是核燃料进入反应堆以前的铀资源的勘查、铀矿采冶、铀纯化与转化、铀同位素分离和核燃料组件制造;二是核燃料在反应堆中的使用;三是燃烧过的核燃料从反应堆卸出以后进行后处理和放射性废物处理处置。第一部分的技术过程称为核燃料循环的前段技术,第三部分的技术过程称为核燃料循环的后段技术。由此可见,核燃料循环前段与后段技术是整个核能技术不可或缺的重要组成部分。在这里,值得提出的是,在乏燃料直接进行深地层处置时,现在均要求可以回取,这实际上隐含着这些乏燃料将来还可能要处理。

核燃料循环的前段技术是核燃料在反应堆中使用的基础,没有核燃料循环的前段技术,就等于反应堆没有燃料;而核燃料循环的后段技术是核燃料在反应堆中使用后燃料的后处理,易裂变物质的回收、再利用,以及放射性废物的处理处置,这是保证充分利用铀资源和保护环境的重要环节。主要由热中子引起裂变反应的热堆,其铀燃料的闭式 U-Pu 循环,已经实现工业化应用,而主要由快中子引起裂变反应的快堆,其闭式 U-Pu 循环还尚未实现工业化应用。核燃料循环工业具有上下游产业的紧密传承性,前段、中段与后段发展规模的匹配性,军民两用功能的多重兼容性,以及前段与后段技术的复杂性,因此它是发展核能技术必不可少的推进剂,是核能可持续发展不可缺少的重要内容。

# 1 世界核燃料循环前段与后段技术基本状况

## 1.1 世界核燃料循环前段与后段技术的国家分布

自从发现核反应可以产生巨大能量以来,核燃料循环工业就迅猛发展起来,核燃料循环工业是一个超长产业链的高端产业,涉及的技术领域广泛复杂,特别是后段燃料循环,不仅存在有极高毒性的钚和次锕系元素(Np、Am、Cm),还存在有强放射性的裂变产物,必须在密闭厚屏蔽的热室中远距离操作。因此在世界上真正拥有完整的核燃料循环工业体系的只是少数几个国家。

就核燃料循环前段技术而言,从事全部活动的国家有美国、俄罗斯、英国、法国、日本和中国,近年来,印度、巴基斯坦、伊朗也有强劲的发展势头(见表 1)。

表 1 世界上从事核燃料循环前段技术活动概况

| 前段技术名称      |          | 国 家                                                                         | 生产技术内容            |
|-------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 铀矿地质勘查与开发   |          | 美国、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、纳米比亚、尼日尔、中国、法国 <sup>1)</sup> 、日本 <sup>1)</sup> | 寻找铀资源、建立铀矿山生产“黄饼” |
| 铀转化生产技术     |          | 美国、英国、法国、加拿大、澳大利亚、印度、日本、巴基斯坦、南非、西班牙、俄罗斯、中国、巴西、南非                            | 生产铀的氟化物、氧化物或金属铀   |
| 铀同位素分离      |          | 俄罗斯、美国、英国、德国、荷兰、日本、法国、中国、巴基斯坦、印度、比利时、西班牙、意大利、伊朗                             | 采用气体扩散法、离心法生产浓缩铀  |
| 核燃料<br>元件制造 | 压水堆燃料元件  | 美国、法国、俄罗斯、日本、中国、韩国                                                          | 生产压水堆第二代、第三代燃料元件  |
|             | 沸水堆燃料元件  |                                                                             |                   |
|             | 重水堆燃料元件  | 加拿大、韩国、印度、罗马尼亚、中国、巴基斯坦、阿根廷                                                  | 生产 CANDU-6 燃料元件   |
|             | MOX 燃料元件 | 比利时、法国、印度、日本、英国、美国、俄罗斯                                                      |                   |

1) 目前主要是利用技术或资金在国外勘查与开发。

世界上采取“一次通过”技术路线,直接对乏燃料进行地质处置的国家有瑞典、加拿大、西班牙,美国;采取闭式循环技术路线的国家,除我国以外,还有法国、英国、俄罗斯、日本和印度(见表 2)。近年来,美国已决定今后对乏燃料进行后处理以便回收铀和钚,实现再循环利用。虽然世界上后段技术存在有“一次通过”和闭式循环两条不同的技术路线,但在核废物处置方面,特别是高放废物的处置方面,都把深地质处置作为现实可行的发展方向。

表 2 世界上核燃料循环技术路线国家分布概况

| 核燃料循环技术路线 | 国 家                         | 主要技术内容                  |
|-----------|-----------------------------|-------------------------|
| “一次通过”    | 瑞典、加拿大、西班牙、美国 <sup>1)</sup> | 对乏燃料直接进行地质处置            |
| 闭式循环      | 法国、英国、俄罗斯、日本、印度、中国          | 回收乏燃料中的铀、钚,用于热堆或快堆燃料再循环 |

1) 虽然过去主张“一次通过”式技术路线,但目前已主张今后对乏燃料进行后处理以后回收铀和钚,实现再循环利用。

## 1.2 核燃料循环前段技术现状

### 1.2.1 铀资源的勘查和开发技术

铀资源勘查技术是随着铀的发现而发展的,开始也是采用传统的地质方法,或者简单地利用探测铀及其子体的放射性获得信息进行找矿。经过近百年来发展,到目前为止,已经形成了完整的勘查体系。

20 世纪 70 年代以来,板块构造理论、古裂谷成矿理论、火山成矿隐爆理论、古熔岩成矿理论及层间氧化带后生成矿理论不断涌现,从而扩展了铀矿地质学家的视野。

世界上具有单个矿床储量巨大、矿床平均品位高、矿床类型新、大多属于盲矿和成矿聚集区内多种类型并存等特点的超大型铀矿不断被发现,总结出了加拿大地盾的阿萨巴斯卡盆地,中亚-欧洲东西向海西巨型褶皱带上的中间地块、波希米亚地块、乌克兰地盾,以及澳大利亚地盾上产出的不整合面型铀矿、花岗角砾杂岩型铀矿、钙结岩型铀矿、碱交代岩型铀矿的分布规律。

以美国为主的铀矿地质学家在砂岩铀矿的发现和勘查过程中,建立了“卷状铀矿床(典型的层间氧化带型砂岩铀矿床)”的成矿理论和模式。前苏联铀矿地质工作者以中亚大量矿床实例为基础,提出了“次造山带控矿理论”,建立了“层间渗入成矿理论”。之后俄罗斯还建立了古河道型砂岩铀矿床的成因地质模式、预测准则。

与此同时,地质勘查技术,包括航空伽玛能谱测量和遥感技术、综合物化探技术、先进钻探技术、计算机技术、地理信息系统得到了有效的应用和扩展,进一步提高了找矿效果。

新地质理论的提出,找矿模式的建立和勘查技术的进步,使世界上新探明的铀资源明显增长。

在最先开始阶段,铀矿的开采与传统的金属开采方法一样,采用坑道、竖井的地下开采方法,或采用剥离覆盖的露天开采等常规方法。开采的铀矿石采用搅拌浸出,并针对不同矿石特性进行酸浸或碱浸。以后奥林匹克坝等巨型多金属铀矿的发现,铀作为副产品得以开发;同时堆浸和原地爆破浸出也发展起来,美国、中亚等低品位、大矿量砂岩型铀矿地浸方法的成功开发,使铀矿开采技术迈入一个新阶段。

利用生物特性的细菌浸出技术也逐渐发展起来,并在生物菌种的选育和培养方面不断取得突破,与浸出技术有机结合,正逐步应用到铀资源开发的实际工作。

当前,国际上铀矿开采总体发展趋势是数字铀矿山和循环经济,从而提高产量、工效和机械化程度,进一步降低了生产成本;水冶加工工艺的机械化和自动化工艺控制程度也得到较大提高。随着采冶技术的进步,天然铀的生产量稳中有升。

世界上天然铀生产方式一直以常规的井下开采和露天开采为主,但采用地浸技术采铀量呈逐年增加的趋势(见表 3)。

表 3 根据生产方式统计的世界铀产量分布百分比 %

| 生产方式 | 2001 年 | 2002 年 | 2003 年 | 2004 年 | 2006 年 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 露天   | 26.1   | 26.8   | 29.8   | 27.6   | 24     |
| 井下   | 44.1   | 43.1   | 41.6   | 39.3   | 41     |
| 地浸   | 15.5   | 18.3   | 18.4   | 19.8   | 26     |
| 堆浸   | 1.4    | 1.9    | 1.9    | 2.0    | —      |
| 副产品  | 12.3   | 9.0    | 9.7    | 11.1   | 9      |
| 其他   | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 0.2    | —      |

注:1. 除 2006 年数据取自《世界采矿杂志》,其他数据均来自 2005 年版《红皮书》;

2. 2004 年数据中 Olympic 坝的产量计入副产品,而不是井下。

1.2.2 铀转化技术

铀及铀化合物的转化过程,称为铀转化。由于原料来源及其性质不同,产品用途各异,

使铀转化的目的和要求也不同。按照转化对象不同,铀转化分为天然铀转化、浓缩铀转化、堆后铀和贫铀转化三类:

第一类为天然铀转化。将铀矿浓缩物加工成为  $\text{UO}_3$  或  $\text{UO}_2$ , 经过氢氟化转化成  $\text{UF}_4$ , 再经过氟化成  $\text{UF}_6$ , 供铀同位素分离厂做原料, 或者  $\text{UF}_4$  经过钙热还原得到金属铀。

第二类为浓缩过的铀-235 的转化。将浓缩过的铀-235 的氟化物转化为铀氧化物和金属铀。生产核电厂反应堆用的陶瓷级  $\text{UO}_2$ 。

第三类为堆后铀(后处理回收的铀)转化成  $\text{UF}_6$ , 以便铀的重新富集再利用, 以及贫铀转化。

由于第一类天然铀的转化过程在铀的转化过程中占绝大部分, 因此, 一般意义上的天然铀转化就是指从铀矿浓缩物到氟化成  $\text{UF}_6$  的转化过程。

世界上建有铀转化生产系统的国家有美国、英国、法国、加拿大、澳大利亚、印度、巴基斯坦、南非、西班牙以及俄罗斯和中国。

国外主要铀转化厂的  $\text{UF}_6$  生产工艺流程不尽相同, 以湿法转化工艺为主(见表 4)。目前世界整体铀转化产能基本稳定, 可以满足需求。

表 4 国外主要铀转化厂  $\text{UF}_6$  生产工艺流程

| 国 家 | 工厂名称       | 生产工艺流程                                                          |
|-----|------------|-----------------------------------------------------------------|
| 美国  | 麦楚波利斯      | 全干法流化床还原、氢氟化和氟化, 后段 $\text{UF}_6$ 精馏纯化                          |
| 英国  | 斯普林菲尔德     | 前段 TBP 萃取纯化, 硝酸铀酰脱硝, 回转炉还原和氢氟化, 流化床氟化                           |
| 法国  | 马尔维奇和皮埃尔拉特 | 前段 TBP 萃取纯化, 硝酸铀酰氨水沉淀, 煅烧, LC 炉还原和氢氟化, 火焰炉氟化                    |
| 加拿大 | 霍普港        | 前段 TBP 萃取纯化, 硝酸铀酰脱硝, 移动床还原, 移动床氢氟化, 火焰炉氟化                       |
| 南非  | AEC        | 铀矿浓缩物湿法处理除钠, 氨水沉淀, 煅烧, LC 炉还原和氢氟化, 火焰炉氟化, 后段 $\text{UF}_6$ 精馏纯化 |
| 俄罗斯 | Minato     | 前段 TBP 纯化, 沉淀, 回转炉分解还原, 流化床氢氟化, 火焰炉氟化, 冷凝纯化                     |

长期以来由于国际铀转化价格低迷, 铀转化在核燃料循环中所占比重很小, 使得各国在铀转化技术改进投入不足, 局限于现有工艺的挖潜。随着核电在世界范围内复兴, 加上俄罗斯高浓铀协议即将到期, 铀转化的需求将不断增长, 已有多家大公司规划提升铀转化产能。其中 AREVA 集团决定投资 6 亿欧元建造现代化的铀转化设施, 称为 Comurhex II。Comurhex II 的生产能力为 15 000~20 000 tU/a, 预计 2012 年投运, 2015 年达产。该项目综合了世界铀转化厂的先进技术, 结合法国铀转化厂几十年的运行经验和铀转化技术研究成果和最新技术创新, 脱硝技术的采用和硝酸根回收系统的设计, 使 AREVA 铀转化工厂缩短了生产流程, 降低了试剂消耗, 节能、节水, 减少了废液废气的排放, 使其生产技术水平处于世界领先地位。这也是世界铀转化发展的趋势。

铀同位素分离后生产核电厂反应堆用的陶瓷级  $\text{UO}_2$  的铀转化过程, 一般将其归入元件制造工艺。为了生产核电厂反应堆用的陶瓷级  $\text{UO}_2$ , 目前国际上采用五种铀转化工艺

流程：

重铀酸铵转化流程(ADU)；三碳酸铀酰铵流程(AUC)；全干法流程(IDR)；流化床法(FBP 流程)和火焰反应法。

目前世界上用 ADU 法生产反应堆用  $\text{UO}_2$  的占 42%，用 AUC 法的占 23%，用各种干法流程生产的占 35%。

堆后铀的转化工艺，与天然铀转化基本相同。而贫铀转化技术可以用催化氢还原法将  $\text{DUF}_6$  转化为  $\text{DUF}_4$ ，同时可以进一步用高温水解转化为  $\text{DUO}_2$ ，或将  $\text{DUF}_6$  在氢气和蒸汽作用下转化成  $\text{DUO}_2$ ；还可以将  $\text{DUF}_6$  经水蒸气或 45% 氢氟酸蒸汽水解，再经高温水蒸气脱氟生成  $\text{DU}_3\text{O}_8$  储存。据不完全统计，世界贫铀储存量大约有 120 万 t。

1.2.3 铀同位素分离技术

国际上比较成熟并已用于工业规模生产的铀浓缩技术有气体扩散法和气体离心法，激光法还处于工程研发阶段。

在上述两种工业应用的铀浓缩技术中，目前气体扩散法的生产能力只占 1/3 左右，其他的基本上用气体离心法进行生产。由于气体扩散法分离系数小，需要串联上千个分离级，设备尺寸大、数量多，工厂占地面积大，且能耗高，经济性差，正逐步被气体离心法所替代。

离心机主要有两种形式，一是超临界离心机，西欧的英国、荷兰、德国开发的工业用离心机，单机分离能力已达 70~100 kgSWU/a；美国研发的超临界离心机更大，其单机分离能力达 350 kgSWU/a，但尚未投入工业应用。二是俄罗斯开发的亚临界离心机，单机分离能力较小，但制造成本较低。巴西、巴基斯坦、印度、南非和伊朗等国也开发了以离心法为主的铀同位素分离技术，但均处于研究或初步应用阶段(见表 5)。

表 5 世界离心技术简况

| 国 家            | 离心技术       | 单机分离能力/(kgSWU/a) |
|----------------|------------|------------------|
| 俄罗斯            | 亚临界离心机     | 1~10             |
| 西欧三国(英国、荷兰、德国) | 单节转筒亚临界离心机 | 1~100            |
|                | 多节转筒超临界离心机 |                  |
| 美国             | 大型超临界离心机   | 350              |
| 日本             | 多节转筒超临界离心机 | 7~21             |

铀浓缩的激光同位素分离技术，一类是原子蒸汽激光同位素分离(AVLIS)、另一类是分子激光同位素分离(MLIS)和同位素选择性激光活化化学反应(CRISLSA)。澳大利亚的 Silex 系统公司在 1990 年以后先与美国铀浓缩公司(USEC)合作，后又单独进行分子激光同位素分离方法研究，现正与美国通用电器公司(GE)合作，分阶段实现商业化，并将在美国建造新的试验回路和中间工厂。

1.2.4 核燃料元件技术

核燃料元件技术是核燃料循环前段技术的最后一个环节，铀燃料按设计经过加工制成芯块，进而加工成元件棒，再进一步制成核燃料组件。

不同堆型有不同的燃料结构形式和生产工艺：大多数动力堆采用陶瓷燃料——二氧化铀，压水堆、沸水堆、重水堆都采用二氧化铀芯块做燃料，由锆合金做包壳。少量发电用反应

堆采用金属铀。世界上半以上的研究堆使用高浓铀(<sup>235</sup>U 丰度≥20%)；钚生产堆用铀金属或铀-铝合金做燃料，采用铝或镁的合金做包壳。

就压水堆核燃料元件而言，20 世纪末，部分公司相互融合，西屋公司、法国 AREVA 公司及俄罗斯 TVEL 公司占据了大部分国际压水堆燃料元件市场，成为世界上三大技术主流。其基本情况列于表 6。

表 6 世界压水堆燃料元件三大技术主流概况

| 公司名称  | 燃料组件名称                       | 包壳材料         | 最大组件燃耗/<br>(GW·d/tU) | 换料周期/月 | 备 注                                                                                        |
|-------|------------------------------|--------------|----------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 西屋公司  | PERFORMANCE+<br>核燃料组件        | ZIRLO<br>锆合金 | >60                  | 24     | 开发了 UO <sub>2</sub> 核燃料芯块外表涂敷一层 ZrB <sub>2</sub> 一体化可燃毒物 (IFBA) 改进推出 ROBUST 和 AP1000 核燃料组件 |
| AREVA | AFA-2G<br>AFA-3G<br>AFA-3GAA |              | >60                  | 18     | 应用了含钐可燃毒物元件                                                                                |
| TVEL  | 六边形 VVER 系列                  | ZrNb<br>锆合金  | 60                   |        | 应用了含钐可燃毒物元件，<br>现正在开发 E635 锆合金                                                             |

值得提出的是，韩国在压水堆燃料元件研制方面，采用引进、合作、改进，加大自主研发力度，取得了明显的成效。他们的第一代压水堆燃料元件是引进美国西屋公司生产技术，1996 年韩国核燃料有限公司与西屋公司合作，开始第二代产品研制，使其热工水力性能在第一代的基础上提高了 10% 以上，其批平均燃耗也由第一代的 43~48 GW·d/tU 提高到 55 GW·d/tU。进入 21 世纪以后，他们又与西屋公司研制新的燃料组件，其热工水力性能也有较大提高，其批平均燃耗也达到 55 GW·d/tU，并于 2008 年商业供应。从 2003 年开始，韩国开始了具有完全自主知识产权的 HPF 组件研制，该组件预计 2015 年开始商业供应。韩国原子能研究院还自主研究开发了高性能 HANA 锆合金，经验证，该合金的各项性能比 Zr-4 合金提高了 50% 以上，用该合金制成的燃料组件预计 2016 年投入韩国核电厂正式使用。

2009 年 7 月世界上有 18 个国家具有核燃料元件生产能力。其中有 14 个国家建有轻水堆燃料制造厂。

众所周知，MOX 燃料无论用于热堆，还是用于快堆，都可以消耗分离钚库存，节省铀转化和铀浓缩费用，减少废物体积，因此 MOX 燃料具有良好的市场前景。

MOX 燃料元件在压水堆核电厂中的应用已有多年的商业实践经验，其应用的国家和核电厂数量正在不断增加。因此，它的设计制造和使用方面的研究是元件发展的重要内容。MOX 燃料的制造工艺一般采用 UO<sub>2</sub> 和 PuO<sub>2</sub> 两种粉末做原料，采用机械混合法制备。在世界上 MOX 燃料元件通过不断改进而有所提高(见表 7)。