



中核四〇四有限公司国外核科技文献翻译丛书

美国乏燃料管理的经济评价

主编 胡晓丹 丁戈龙 刘文彬



原子能出版社

中核四〇四有限公司国外核科技文献翻译丛书

美国乏燃料管理的经济评价

作者 Rick Peters Pattabi Seshadri
Guillaume Aubert
Tommaso Barracco
Laurent Billès-Garabédian

主编 胡晓丹 丁戈龙 刘文彬

翻译 孙银峰

审校 韩秉魁 张 焰 丁戈龙
贾瑞和 刘文彬 蒋建国
牛爱文

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

美国乏燃料管理的经济评价/胡晓丹,丁戈龙,刘文彬主编.
—北京:原子能出版社,2010.1
ISBN 978-7-5022-4797-3

I. 美… II. ①胡… ②丁… ③刘… III. 核燃料后处理—
燃料管理—经济评价—美国 IV. F471.262

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 016986 号

美国乏燃料管理的经济评价

总 编 辑 杨树录

责任编辑 卫广刚

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰 潘玉玲

印 刷 中国文联印刷厂

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

经 销 全国新华书店

开 本 850 mm×1168 mm 1/32

印 张 3.25 字 数 87 千字

版 次 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4797-3 定 价 28.00 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

中核四〇四有限公司
《国外核科技文献翻译丛书》

一、出版委员会

主 任 王俊峰

副主任 张天祥 姚守忠 胡晓丹 韩建平 李江颖 张燕春

二、编译委员会

主 编 胡晓丹 丁戈龙 刘文彬

成 员(按姓氏笔划排序)

牛爱文	付云杉	代云水	任 立	刘学刚	孙小玉
孙银峰	宋崇立	张 伟	张彩云	陆文博	武成玉
贾娅敏	梁 勇	焦荣洲	蒙金红		

三、审校组成员(按姓氏笔划排序)

王 邵	王玉荃	付云杉	代云水	任 立	刘秋生
孙志杰	孙银峰	宋崇立	张 伟	张 焰	李元洪
李嘉良	杨吉荣	陈海腾	南洁滨	胡丕显	贾瑞和
黄 勃	焦荣洲	韩秉魁	蒋建国		

四、编辑组成员(按姓氏笔划排序)

王海峰	付云杉	代云水	田 甜	刘大伟	孙志杰
余东昌	张振兴	李连顺	杨 莉	杨吉荣	陈 亮
蒋建国					

总 序

核科技是一个相对年轻的专业科技领域,其起源和发展到现在不过百年历史。我国的核科技起步晚,发展快,有着广阔的市场发展潜力。随着我国大力发展核电,完善核燃料循环系统、加快推进后处理技术发展,我国核科技事业面临的前所未有的挑战。在新形势下,加强核科技交流与合作与技术引进就显得尤为重要。

中核四〇四有限公司是我国体系最完整、规模最大的核工业联合企业,核科技在这里既有着广泛的应用,又有着巨大的需求。为了更好地借鉴先进技术,推动核科技事业的发展,中核四〇四有限公司核信息中心组织专业人员翻译了这套《国外核科技文献翻译丛书》(以下简称《丛书》)。这是一项重大的科技工程,我很赞成,也很高兴看到《丛书》的出版发行。

《丛书》致力于推介核工业的最新技术,翻译了大量美、英、俄等核科技发展和应用强国的专业文献,涉及专业广,有着很强的技术性和指导性;同时介绍了国际原子能机构发布的行业标准、政策等。《丛书》的出版对我国核工业科技工作者开阔眼界,探索新技术、新领域提供了有益的参考。

科学技术是第一生产力,科技的发展离不开交流与借鉴,相信这套《丛书》的出版必将为我国核科技事业的发展提供有力的支撑。在此,我向《丛书》的翻译者表示感谢,并向广大科技工作者推荐这套《丛书》。

潘自強

目 录

摘要	(1)
1 背景和方法	(6)
1.1 背景	(6)
1.2 方法	(9)
2 乏燃料管理策略和关键部分	(13)
2.1 乏燃料管理策略	(13)
2.1.1 “格林菲尔德(Greenfield)”方法	(13)
2.1.2 “实现(Implementation)”方法	(15)
2.2 关键部分	(16)
2.2.1 一体化再循环工厂	(17)
2.2.2 处置库	(17)
3 评价结果	(19)
3.1 “格林菲尔德(Greenfield)”方法	(20)
3.1.1 经济性	(21)
3.1.2 敏感性分析	(29)
3.2 “实现(Implementation)”方法	(31)
3.2.1 经济性	(31)
3.2.2 敏感性分析	(34)
3.2.3 燃料流	(35)

3.2.4	融资需求	(37)
3.2.5	风险管理	(38)
4	实现再循环的问题	(43)
5	结论	(46)
	附录	(48)
A1	关键方法	(48)
A2	乏燃料体积	(50)
A3	贴现率	(55)
A4	一体化再循环工厂	(58)
A5	处置库	(62)
A6	运输	(68)
A7	中间贮存	(71)
A8	来自再循环燃料的收益	(72)
A9	主要假设的不确定性	(79)
A10	MOX 乏燃料的管理	(83)
A11	“实现(Implementation)”方法中的经济性	(88)
	术语表	(92)
	缩写词	(93)
	参考文献	(94)

美国乏燃料管理的经济评价

2006 年 7 月,波士顿咨询集团为 AREVA 编制的报告

摘要:40 a 来,政府和工业界已讨论了乏燃料管理的若干方案。在这 40 a 间,核电已发展到了整个工业界。利用核能的国家已采用了不同的乏燃料管理策略——一些国家实行“再循环”策略,乏燃料经处理后,重新用作新反应堆燃料的组分;另一些国家实行“一次通过”策略,将未经处理的乏燃料贮存起来,以后将放入永久地质处置库。

在过去 20 a,美国一直从事乏燃料处置的地质处置库(一次通过策略,在内华达州的尤卡山)的开发。该策略的主要优点是:(1) 能处理所有遗留的乏燃料(2005 年,估计为 54 000 t^①,目前贮存于核电厂);(2) 能处理冷却和中间贮存后卸出的其他乏燃料,条件是开发额外的处置库容量;(3) 处置后,不再需要对乏燃料进行处理,这样可使一次通过策略成为全寿期解决方案。

2001 年^②,美国能源部(DOE)对美国一个贮存商业乏燃料总量为 83 800 t 的处置库进行的费用评估表明,其寿期投资约为 460 亿美元^③,不包括在核电厂的中间贮存费用。

① 在本研究报告中,“吨”始终指公吨。

② 美国能源部——《民用放射性废物管理计划的总寿期成本分析》——2001 年。

③ 美国能源部未贴现的寿期成本估算是按 2005 年的美元报出的,不包括非商业核废物处置的估算成本。

不过,最近十年,若干因素已对作为唯一的乏燃料管理策略的一次通过燃料循环的适当性提出了质疑,尤其表现在以下几个方面:

- 尤卡山处置库的一次通过策略的费用估算已明显高于初始估算,部分原因是设计要求越来越严格。此外,按照目前的乏燃料产生速率,对于 2035 年后卸出的乏燃料而言,可能需要额外的处置库容量,即使考虑到尤卡山处置库容量可以扩大到 120 000 t 乏燃料^①。
- 根据 2005 年能源政策法中的鼓励因素,美国的核电装机容量可能在长期内不断增大——从目前的 103 GW 装机容量增大到至少 112 GW,并且可能增大到 160 GW,特别是如果大幅削减碳排放的立法生效。因此,必须考虑其他的乏燃料管理策略。
- 乏燃料管理替代方案(例如,再循环)的潜在经济性已变化,引起此变化的部分原因是较高的铀价及对再循环副产物的长期行为有了较深入的了解,从而使处置库空间显著优化。
- 由于再循环技术 40 多年良好的工业运行效果以及在实际运行中表现出的较高经济性,再循环策略已得到了公认,从而也使得一些连续的工艺和设计改进成为可能。

作为全面核废物管理策略的一部分和一次通过策略的额外补充,这些因素使进一步研究再循环策略变得很重要。

在这种背景下,AREVA 资助波士顿咨询集团(BCG)进行独立研究,来评价核燃料循环后段的经济性,尤其是美国开发再循环策略的经济性。该研究考虑了美国的特殊情

^① 利用厂址内地质方面适宜的可用区域,在尤卡山可以达到的估算“技术容量”。

况(例如,处理遗留乏燃料的需要),并考虑了与当前尤卡山处置库项目可能存在的互补性。它也考虑了除经济性之外的因素,例如,乏燃料流、融资要求和潜在的风险管理利益。

其经济性是用两种分析方法来获得的。第一种分析方法是对乏燃料再循环长期估算成本和一次通过策略中处理相同乏燃料的处置库潜在成本进行的理论比较。该比较称为“格林菲尔德(Greenfield)”方法。第二种分析方法是尤卡山处置库开发方案的再循环策略(称为“组合(portfolio)”策略)与将来纯粹一次通过需要的额外处置库容量的策略进行的比较。该比较称为“实现(Implementation)”方法。

适当时,BCG 利用 AREVA 20 多年来的核再循环经验的技术诀窍和专利数据,并经过现场考察和额外分析补充 AREVA 运行数据,BCG 以此数据为突破点进行了再循环策略独立的第三方评价。BCG 利用其工业成本分析、规模经济的经验及运行经验等对关键经济驱动因素特别是那些与再循环有关的因素进行了三角剖分和验证,并对关键差异(例如,运输和贮存)进行了自底向上的估算和三角剖分。最后,BCG 利用了有关处置库经济性的现有公开信息源,并考虑已知和公认的变化对其进行了更新,评价结论如下。

在“格林菲尔德(Greenfield)”方法中,乏燃料再循环的总成本大约为 520 美元/千克,与一次通过策略的成本(估计大约为 500 美元/千克)相差不大,特别考虑了评价中用到的诸如铀价和处置库成本的许多变量的不确定度。

在“实现(Implementation)”方法中,基于 2020 年开始运行、处理能力为 2 500 t/a 以及来自再循环的高放废物(HLW-R)和未经处理的遗留燃料的处置库(尤卡山)的开发,组合策略的总净现成本为 480 亿~530 亿美元。该评价基于再循环工厂中不分离纯钚的 COEX™ 处理流程。尤

卡山处置库和额外的处置库的纯粹一次通过策略的净现成本估计为 470 亿~500 亿美元。组合策略的未贴现的总寿期成本大约为 1 130 亿美元,而一次通过策略的未贴现的总寿期成本为 1 240 亿~1 300 亿美元,在一次通过策略中,较大一部分成本延期发生。考虑到本研究中所用假设的固有不确定性,这两种策略的经济性相差不大。

该研究旨在研究核燃料循环后段的经济性,并不讨论其他主题或准则,例如,公众接受度、环境或不扩散问题,即使 BCG 承认决策者权衡可选方案的优点时这些主题对决策者的重要性。该研究不明确涉及或讨论为美国的再循环策略铺平道路所需的立法行动。

同所有其他方案一样,再循环策略涉及一些需要解决的问题。特别是,成功实现再循环将需要:

- 核工业广泛接收再循环燃料,因为再循环燃料必须用于大量的反应堆。
- 对再循环有利的法律、政策和财政环境。
- 确定数量比较有限的 MOX 乏燃料的最佳管理方案,例如,用于快堆或多次再循环,并且,在时间方面具有灵活性。

此外,作为组合策略的一部分,再循环会产生许多利益:

- 在 2070 年之前,不需要超过 83 800 t 的尤卡山处置库初始容量的额外的处置库容量。
- 有助于及早减小反应堆厂址的乏燃料存量——特别是在卸出后 3 a 内,移出较新和放射性较高的乏燃料进行再循环,不需要对中间贮存能力进行追加投资。
- 依靠现有技术;作适当的修改,可以作为向未来技术发展(例如,先进燃料循环和快堆)的过渡。

- 表明在当前可用的融资范围内,在 2030 年前可能满足一次通过策略的现金流需求,或甚至到 2050 年及以后可能满足现金流需求,如果尤卡山处置库仅在再循环工厂运行头几年后开始接收乏燃料。
- 通过提供 MOX 燃料和再循环 MOX 燃料^①,为核电部门提供预防铀价增高的工具。MOX 燃料和再循环 MOX 燃料的生产成本与铀价和浓缩成本无关。

这些利益使得进一步考虑再循环具有吸引力,再循环值得作为发展尤卡山处置库容量的补充方法。

本报告的结构如下:简要描述背景和方法(第 1 节)后,描述乏燃料管理的主要方案,提供主要经济评价结果(第 2 节)。然后介绍成本分析、燃料流、融资和风险管理及更详细的结果(第 3 节)。提出美国成功实现再循环策略需要克服的主要问题(第 4 节)。最后,得出结论(第 5 节)。有关具体假设、方法和主要经济评价结果的详细信息在附录中予以介绍。

① 估计能满足 20%~25% 的美国燃料需求的 MOX 和再循环 UOX 燃料。

1 背景和方法

1.1 背景

40 a 来,政府和工业界已讨论了乏燃料管理的若干方案。在这 40 a 间,核电已发展到了整个工业界。利用核能的国家已采用了不同的乏燃料管理策略——一些国家实行“再循环”策略,乏燃料经处理后,重新用作新反应堆燃料的组分;另一些国家实行“一次通过”策略,将未经处理的乏燃料贮存起来,以后将放入永久地质处置库。在占全球核电装机容量 30%~40% 的若干国家已采用再循环策略,而其余国家则采用将乏燃料贮存起来以便最终永久处置的策略。

目前,全球有 4 个正在运行的后处理厂:第一个位于法国的阿格 (La Hague),与位于 Melox 的 MOX 燃料制造厂一起由 AREVA 运行;第二个位于英国的塞拉菲尔德 (Sellafield),由英国核燃料有限公司 (BNFL) 运行;第三个位于俄罗斯的奥焦尔斯克 (Ozersk),由俄罗斯政府运行 (马雅克 (Mayak) 厂);第四个位于日本的六所村 (Rokkasho-mura),由日本核燃料有限公司 (JNFL) 运行^①。目前,没有正在运行的商业乏燃料处置库,而一些处置库目前处于开发或许可证申请阶段 (例如,美国的尤卡山处置库和芬兰的奥尔基洛托 (Olkiluoto) 处置库)。

在过去 20 年,美国一直从事乏燃料处置的地质处置库 (内华达州的尤卡山) 方案 (一次通过策略) 的开发。该策略的主要优点是: (1) 能处理所有遗留的乏燃料 (在 2005 年,估计为 54 000 t,目前贮存于核电厂); (2) 能处理冷却和中间贮存后卸出的额外的乏燃料,

^① 日本的六个所厂,目前处于试验阶段。

条件是开发额外的处置库容量；(3) 处置后,不再需要对乏燃料进行处理,这样可使一次通过策略成为全寿期解决方案。

2001 年^①,美国能源部(DOE)对美国一个贮存商业乏燃料总量为 83 800 t 的处置库进行的费用评估表明,其寿期投资约为 460 亿美元^②,不包括在核电厂的中间贮存费用。

不过,在过去的十年间,若干因素已对作为唯一的乏燃料管理策略的一次通过燃料循环的适当性提出了疑问,尤其表现在以下几个方面:

第一,尤卡山处置库的一次通过策略的费用估算已明显高于初始估算,部分原因是设计要求越来越严格。此外,按照目前的乏燃料产生速率,对于 2035 年后卸出的乏燃料而言,可能需要额外的处置库容量,即使考虑到尤卡山处置库容量可以扩大到 120 000 t 乏燃料^③。

第二,根据 2005 年能源政策法中的鼓励因素,美国的核电装机容量可能在长期内不断增大——从目前的 103 GW 装机容量增大到至少 112 GW,并且可能增大到 160 GW,特别是如果颁布大幅削减碳排放的法律(“核复兴”情况)。因此,必须考虑其他的乏燃料管理策略。图 1 示出了处置一次通过策略中的乏燃料的估算时间范围,它考虑了核电乏燃料的总累积量和需要扩大的尤卡山处置库容量。

第三,乏燃料管理替代方案(例如,再循环)的潜在经济性已变化,引起此变化的部分原因是较高的铀价及对再循环副产物的长期行为有了较深入的了解,从而使处置库空间显著优化。

最后,由于再循环技术 40 多年来良好的工业运行效果以及在实际运行中表现出的较高经济性,再循环策略已得到了公认,经验反馈

① 美国能源部——《民用放射性废物管理计划的总寿期成本的分析》——2001 年。

② 美国能源部未贴现的寿期成本估算是按 2005 年的美元报出的,不包括非商业核废物处置的估算成本。

③ 利用厂址内地质方面适宜的可用区域,在尤卡山可以达到的估算“技术容量”。

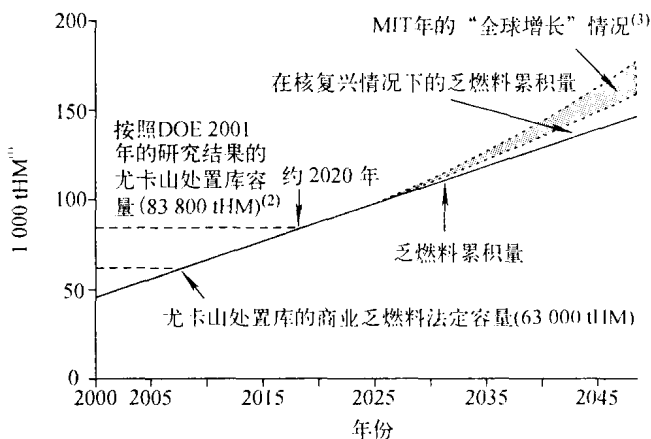


图 1 估算的商业乏燃料总累积量

(1) tHM 表示重金属吨数。

(2) 美国 DOE——民用放射性废物管理计划的总寿期费用分析—2001。据 DOE EIS 报道,所考虑的尤卡山处置库补充容量为 105 000 t。

(3) MIT——《核电的未来》—2003,全球增长情况(到 2050 年,装机容量为 300 GW)。

也使得一些连续的工艺和设计改进成为可能。

在这种背景下,AREVA 资助波士顿咨询集团(BCG)进行了独立研究,来评价核燃料循环后段的经济性,尤其是美国开发再循环策略的经济性。该研究考虑了美国特殊的情况(例如,处理遗留乏燃料的需要),并考虑了与当前尤卡山处置库项目可能存在的互补性。它也考虑了除经济性之外的因素,例如,乏燃料流、融资要求和潜在的风险管理利益。

该研究旨在研究核燃料循环后段的经济性,并不讨论其他主题或准则,例如,公众接受度、环境或不扩散问题,即使 BCG 承认决策者权衡可选方案的优点时这些主题对决策者的重要性。该研究不明确涉及或讨论为美国的再循环策略铺平道路所需的立法行动。

1.2 方法

该研究旨在研究再循环的工业前景——综合考虑了基于 AREVA 现有设施实际运行经验的具体成本经济性,BCG 对进入新市场的新技术和现有技术的工业成本进行了估算,并对大规模工厂的效益进行了评价,考虑了由于运行经验而使成本降低的可行范围等内容。从过程来看,BCG 能促使法国 AREVA 改变过去 20 a 在核燃料再循环方面的运营经验和专业知识。

对于每个关键部分而言,BCG 分析了 AREVA 提供的数据,采取独立的第三方观点,利用其工业成本分析的经验来验证假设,在许多情况下,用特定的方法和框架来对敏感数据元素进行三角剖分或解释,与以前报道的数据进行比较来研究成本差异。具体地说,BCG 估算了占总成本绝大部分的再循环工厂的成本,BCG 在估算新市场采用现代化技术所需的成本时综合考虑了当地情况和来自以前经验的收益。

BCG 获益于“开卷”方法,在该方法中,AREVA 提供了来自阿格和 Melox 有专利权的运行和衡算数据。此外,AREVA 安排了必要的工厂考察,提供了接触各种在每个相关运行领域内的技术和经济专家的机会。尽管此努力不意味着对数据进行衡算审查以检验其准确性,但它使 BCG 获得了对此研究基本假设的信心,并维持较高水准的严格的分析要求。

除利用 AREVA 信息以外,BCG 也从公司外部的各种来源获得了关键假设的输入和反馈。与能源工业、学术界和美国能源部国家实验室的专家进行了非正式会谈。最后,BCG 通过审查以前的研究结果和分析现有文献,进行了补充研究。BCG 在估算一次通过策略的成本时特别利用了公开信息,一次通过策略与再循环不同,在世界上任何地方尚未采用,但对其已进行了经济研究,例如,2001 年的美国能源部寿期成本估算。

通过以上举措,BCG 完全掌握了新出现的研究结果、关键信息和分析比较得出的结论。按照 BCG 与 AREVA 的协议,AREVA 公