

决策咨询系列



国家科学思想库

中国核燃料循环技术发展 战略报告

中国科学院



科学出版社



国家科学思想库

中国核燃料循环技术 发展战略报告

中国科学院



科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

中国核燃料循环技术发展战略报告 / 中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-054346-2

I. ①中… II. ①中… III. ①核燃料-燃料循环-发展战略-研究报告-中国 IV. ①TL249

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第215809号

丛书策划: 胡升华 侯俊琳

责任编辑: 侯俊琳 牛玲 张翠霞 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张欣秀 / 封面设计: 黄华斌 陈敬

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018年3月第一次印刷 印张: 18 3/4

字数: 377 000

定价: 98.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

咨询报告专家组

组 长

柴之芳 研究员 中国科学院院士 中国科学院高能物理研究所

成 员

顾忠茂	研究员		中国原子能科学研究院
刘元方	研究员	中国科学院院士	北京大学
王方定	研究员	中国科学院院士	中国原子能科学研究院
朱永贽	教 授	中国工程院院士	清华大学
阮可强	研究员	中国工程院院士	中国核工业集团公司
周培德	研究员		中国原子能科学研究院
喻 宏	研究员		中国原子能科学研究院
韦悦周	教 授		广西大学
尹邦跃	研究员		中国原子能科学研究院
李 隽	教 授		清华大学
陆道纲	教 授		华北电力大学
王祥云	教 授		北京大学
叶国安	研究员		中国原子能科学研究院
赵宇亮	研究员		中国科学院高能物理研究所， 国家纳米科学中心
孙 颖	研究员		中国工程物理研究院
汪小琳	研究员		中国工程物理研究院
张生栋	研究员		中国原子能科学研究院
吴王锁	教 授		兰州大学
张安运	教 授		浙江大学
王祥科	研究员		中国科学院等离子体物理研究所
夏晓彬	研究员		中国科学院上海应用物理研究所
石伟群	研究员		中国科学院高能物理研究所
刘学刚	副教授		清华大学
刘春立	教 授		北京大学

咨询报告评议专家名单

沈文庆	研究员	中国科学院院士	中国科学院上海应用物理研究所, 国家自然科学基金委员会
詹文龙	研究员	中国科学院院士	中国科学院
王乃彦	研究员	中国科学院院士	中国原子能科学研究院, 北京师范大学
李冠兴	研究员	中国工程院院士	中国核学会, 中核北方核燃料元件有限公司
陈佳洱	教授	中国科学院院士	北京大学
陈和生	研究员	中国科学院院士	中国科学院高能物理研究所
方守贤	研究员	中国科学院院士	中国科学院高能物理研究所
胡仁宇	研究员	中国科学院院士	中国工程物理研究院
张焕乔	研究员	中国科学院院士	中国原子能科学研究院
汲培文	研究员		国家自然科学基金委员会
蒲 钊	研究员		国家自然科学基金委员会
梁文平	研究员		国家自然科学基金委员会
陈 荣	研究员		国家自然科学基金委员会
孙 颖	研究员		中国工程物理研究院
严叔衡	研究员		中国核工业集团公司
宋崇立	研究员		清华大学
郑华铃	研究员		中国核工业集团公司
李金英	研究员		中国核工业集团公司
罗上庚	研究员		中国原子能科学研究院
徐景明	研究员		清华大学
郭景儒	研究员		中国原子能科学研究院
陈 靖	教授		清华大学
徐 铄	研究员		中国原子能科学研究院

前言

核燃料循环是核能系统的“大动脉”，要想确保我国核能的安全和可持续发展，必须建立一个适合我国国情的、独立完整的及先进的核燃料循环科研和工业化体系。

为适应我国国民经济平稳而较快发展的需要，并控制温室气体的排放，我国已制定了在确保安全的基础上高效发展核电的方针。根据国家《核电中长期发展规划（2005～2020年）》，我国核电发展的预定目标是到2020年核电运行装机容量达到4000万kW甚至更高。在2020年以后，我国核电必须以更大的规模发展，才能满足国家电力需求，优化能源结构，发展低碳经济，从而保证我国国民经济的可持续发展。

核燃料循环中的乏燃料后处理是目前已知的最复杂和最具挑战性的化学处理过程之一。国际核能界的共识是，在现阶段的核能发展中，最担忧的就是核电产业前、后端发展不平衡。乏燃料后处理和废物处置是很复杂的事情，需要先进的技术。要想核电产业向前发展，一定要高度重视乏燃料后处理问题。日本福岛核电站事故的发生，尤其是核燃料元件的破损和乏燃料池的放射性泄漏，更充分说明了建立一个安全的核燃料循环体系的重要性。

与发达国家相比，我国的核电发展起步较晚，核燃料循环技术在总体上比较落后。尤其是我国核燃料循环后段研究滞后，尚未形成工业能力，是我国核能体系中最薄弱的环节，在铀钚氧化物核燃料元件制造和乏燃料后处理等关键领域甚至比印度还落后。所以我国必须加快核燃料循环技术的研发，尤其是后段技术的研发。更要着重指出的是，与我国各级政府高度重视核电站建设相比，核燃料循环体系的研发严重滞后，势必影响我国核电的可持续发展，更会给核电安全带来潜在危害。为此，中央领导早就对我国核燃料循环等有关问题做出了“亡羊补牢，犹未为晚”“要奋起直追地往前赶”“必须重视此问题，认真研究，

作出部署”的重要批示，为我国在 21 世纪建成安全和先进的核燃料循环体系指明了方向。

我国遵循从压水堆（PWR）到快堆（FBR）的核裂变能发展战略，并选择与之相适应的核燃料闭式循环技术路线。为此，必须建立一套独立完整和先进的核燃料闭式循环体系。核燃料循环后段包括：①压水堆乏燃料后处理；②快堆燃料（金属氧化物或金属合金）制造；③快堆乏燃料后处理；④高放废物处理与处置等。先进的核燃料循环体系可以实现核能资源利用的最大化和放射性废物的最少化，是实施我国从压水堆到快堆发展战略、实现核裂变能安全且可持续发展的关键。与核燃料循环前段相比，我国核燃料循环后段长期缺乏统一领导和科学规划，经费投入不足，研发力量分散，基础研究缺乏支持，工程技术相当落后，迄今尚未形成产业化，已成为我国核燃料循环中最薄弱的环节。

2009 年 6 月 8 日，时任中国科学院院长路甬祥同志批示：“核燃料循环及乏燃料处理对我国核能发展至关重要，要充分重视，加强研究，明确路线图，并在国家支持下付诸实施。应组织专题研究，将核燃料循环利用和乏燃料后处理的发展路线图进一步搞清楚，向中央建议，并分步组织实施。”根据这一批示，中国科学院学部咨询委员会组织相关专家，启动了咨询研究项目，从核能可持续发展的战略高度研究我国核燃料循环技术的发展路线。

本咨询报告旨在科学评估当代国际核燃料循环技术的现况和发展动向，提出我国核燃料循环后段应采取的技术路线，为我国核能的可持续发展提供具有科学依据的建议。咨询报告的标准是：①立论有据；②事实清楚；③分析准确；④建议合理。

本咨询报告由下列九部分组成：①关于我国核燃料后处理/再循环的一些思考；②国外先进核燃料循环后段技术发展动向；③热堆和快堆乏燃料后处理技术分析；④核燃料增殖的快堆内循环研究；⑤金属氧化物和金属燃料制造技术；⑥快堆及其燃料循环技术经济性初步分析；⑦高放废物处理研究及展望；⑧钍铀循环的现状、问题和对策；⑨核燃料循环中的新方法、新材料和新技术。

咨询专家组经过调研，认为当前我国核燃料循环技术发展中的主要问题有以下几方面。

（1）核燃料循环管理体系分散。多部门、多机构之间条块分割，难以协调一致，造成资源巨大浪费，导致核燃料循环没有国家决策的尴尬局面。

（2）科研力量薄弱，后备人才短缺。我国从事核燃料循环的科研力量不足，而且有限的队伍分散在中国核工业集团公司、中国科学院、高等院校和国防科研部门等，缺乏有效合作，这造成科研和产业化之间脱节。

(3) 核燃料循环后段的基础研究薄弱。与核燃料循环前段及核电站建设相比,投资太少,从事核燃料循环的科研人员的待遇远低于商业核电站的从业人员。这在很大程度上会影响我国核电事业的可持续发展。

(4) 核燃料循环技术体系中的主要环节发展不协调。例如,后处理大厂的建设滞后于商用示范快堆机组的建设;如果引进俄罗斯 BN-800 型快堆电站将不得不同时购买其燃料,我国自主研发的示范快堆可能面临“无米之炊”的困境;设想中的加速器驱动次临界反应堆(accelerator driven sub-critical system, ADS)系统的次临界示范堆超前于我国第二座后处理厂等。

上述问题已严重影响到我国在确保安全的前提下高效发展核电的方针的实施。针对这些问题,咨询专家组对我国核燃料循环技术发展提出了以下政策性建议。

(1) 统筹规划,合理布局,做好核燃料循环后段的国家级顶层设计。核燃料循环是核裂变能系统的“动脉”和核能可持续发展的支柱。乏燃料后处理技术的研发在世界各国毫无例外地属于政府行为,必须由政府部门代表国家进行策划,坚持政府决策、指导和监管的原则,必须做好国家级顶层设计和系统策划。由国家统筹规划,组织实施,分步推进,有序发展。顶层设计应包括三个不同的科研层次(基础研究、应用研究和工艺研究)和三个不同的技术层次(主线技术、培育性技术、探索性技术)的总体布局和统筹规划。要依据国家核能发展目标,充分考虑我国现有技术基础和发展潜力,参考和借鉴国外核燃料循环发展计划,制定出具有前瞻性、全局性、权威性和可操作性的我国核燃料循环发展路线图。一定要遵循基础研究(重点是科学问题)、应用研究(重点是技术问题)和产业化实施(解决工艺问题)的有机整合。建议尽快设立国家级以科学家为主的“核燃料循环技术发展咨询委员会”,从国家重大需求出发,在国家层面对我国核燃料循环发展路线图、核燃料循环重大项目的设立,以及核燃料循环人才的培养等进行决策和评价。消除“行业垄断,条块分割,政出多门”这种严重阻碍核燃料循环发展且浪费国家资金的现象。建议该咨询委员会由国务院委托中国科学院学部和中国工程院学部聘请国内不同单位具有较高学术造诣、处事公正的专家组成,同时还可吸收部分有战略决策能力的管理专家。汇聚中国科学院、高等院校、中国核工业集团公司、国防科研部门和产业界等相关科学技术队伍,分工合作,为建成具有我国自主知识产权的先进核燃料循环体系奠定体制基础。

(2) 建议科技部尽快组织核燃料循环重点基础研究发展计划。采取积极政策,支持核燃料循环基础和应用研究,结合我国核电建设、乏燃料后处理、高放废物处置等现状,建议在“十三五”期间启动一批核燃料循环科研项目。

(3) 建议教育部建立核燃料循环专业基础研究和人才培养基地。我国核燃料循环专业的人才培养相当薄弱,与国家重大需求有较大差距。建议在“十三五”期间,教育部在我国有基础的高校中加强对核燃料循环专业的支持和投入。美国现有 60 余所大学参与核燃料循环后段的基础研究,而我国只有寥寥几所。参照美国等国家的研究生计划,建议我国每年拨付不低于 1000 万元的专款培养核燃料循环专业研究生,提高研究生奖学金。

(4) 以自力更生为主,开展国际合作。在核燃料循环后段研发和后处理大厂建设方面,应以自力更生为主,开展“以我为主”的国际合作。对我国正在洽谈的引进法国阿海珐(AREVA)集团的后处理设施一事,要在国家层面展开科学认证,不宜全盘高价引进。此外,一定要积极部署核燃料后处理化学的基础研究、工艺研究和设备研究,给我国的核燃料后处理打下坚实基础,使我国在国际谈判中处于主导地位。建议在乏燃料后处理基础研究领域,充分发挥中国科学院和高等院校的作用。

(5) 共享核燃料循环科研平台,发挥我国大科学装置的作用。国内正在建设的重要科研平台包括乏燃料后处理实验设施、快堆燃料研发实验室、高放废物处理与处置实验室等。以上设施都应作为国家级的核燃料循环后段研发平台,向国内相关单位开放使用。建议成立国家“核燃料循环重点实验室”。建议北京光源或上海光源建立放射性束线站,专门用于铀、钚等锕系元素物理化学表征的研究。同时,还应充分发挥我国高性能超级计算机在核燃料循环研究中的作用。

(6) 加快核电立法。建议国家加快核电立法,从核电电费中适当提高一定份额的乏燃料基金,用于开展乏燃料后处理的研发工作,并将核燃料循环研发人员的待遇提高到核电厂从业人员的水平。同时,需要思考如何建立具有中国特色的社会主义市场经济下的核燃料循环体制。既要明确国家的主导和监管作用,又要发挥企业和民营资本的积极性。

同时,咨询专家组还对我国核燃料循环发展提出技术性建议。

(1) 我国快堆核燃料循环发展宜采取“先增殖、后嬗变”的技术路线。我国与发达国家不同,属于核能后发展国家,在相当长的一段时间内,乏燃料积累的压力不大,且分离-嬗变技术的研究也刚起步,快堆增殖的需求则比较迫切。所以,我国宜在 2050 年之前主要实施快堆增殖核燃料,放射性废物的嬗变(焚烧)可以在 2050 年之后开始工程应用实施。ADS 在放射性废物嬗变方面与快堆焚烧相比具有更大优势,所以从我国核能可持续发展战略中的地位来看,快堆侧重于核燃料的增殖,ADS 侧重于放射性废物的嬗变,这是比较合理的选择。当然,ADS 面临一系列具有挑战性的工程难题需要解决,包括系统的可靠性、可用性、

可维修性及可监测性等,需要进行深入的研发。同时,应积极部署 ADS 中核燃料循环化学等关键科学技术问题的研究,目前的情况是,与质子强流加速器相比,核燃料循环的投入太少,重视不够,这必将贻误 ADS 的建设。

(2) 应使我国燃料资源利用最大化。对铀资源利用率影响最大的是燃料燃耗深度和后处理及燃料再制造过程中的燃料回收再利用率。为了将铀资源的利用率提高 60 倍,在相对燃耗深度为 20% 时,需要将核燃料在快堆中循环 10 次以上。这样,可使我国的铀资源供应达到千年以上。建议对核燃料增殖的科学和技术问题进行深入研究。

(3) 分离钚。从目前运行的压水堆中分离出的钚(简称分离钚)可跳过热堆循环这一步,直接进行快堆核燃料循环,这样有利于核燃料的增殖。前提是快堆发展计划需如期实施,这将是一个适合我国国情的合理方案。

(4) 热堆乏燃料水法后处理。近期的研究工作要为我国后处理中试厂稳定运行提供支撑技术;中长期目标是研究先进后处理中的新原理、新方法和新工艺流程,为商业后处理厂提供科技支持。宜在国际上成熟的普雷克斯流程(Purex 流程,用磷酸三丁酯作萃取剂分离回收铀和钚的乏燃料后处理流程)基础上,提出改进型的 Purex 主流程(如先进无盐二循环流程)和从高放废液中分离次锕系元素(MA)的辅流程,力争使我国多年来的后处理研究成果能应用于后处理大厂工艺流程的设计。除了工艺流程研究之外,还包括专用工艺设备及材料研究(特别是乏燃料剪切机和溶解器)、分析检测技术研究、远距离维修设备、自控系统、临界安全研究等。

(5) 在确保铀-钚循环这条主线的前提下,应启动包括熔盐堆在内的钍-铀循环的探索性和前瞻性研究。关于我国核能体系中利用钍的可能方式,咨询组经过分析后指出,热堆使用钍优于快堆,而在快堆增殖层中增殖 ^{233}U 的能力优于热堆。鉴于我国热堆电站的主导堆型是压水堆,所以,我国应首先考虑在压水堆中使用钍,从而使钍资源作为铀资源的补充,适当延长热堆电站的使用时间。同时,也应发挥快堆的增殖优势,在快堆增殖层中生产 ^{233}U ,分离后供热堆使用。此外,我国有必要开展熔盐堆的研究,首先应着重研究熔盐堆钍循环过程中的化学问题和材料问题。

(6) 我国核燃料循环技术产业化发展的推荐路线图分为三个阶段。第一阶段(2011 ~ 2025 年):建成热堆乏燃料第一座商用后处理厂和快堆钚钚混合氧化物(mixed oxide of uranium and plutonium, MOX)燃料制造厂;完成热堆乏燃料先进后处理主工艺和高放废液分离工艺中试;完成快堆 MOX 乏燃料水法后处理台架实验;完成金属合金燃料制造工艺中试;建设干法后处理和熔盐实验平台;完

成高放废液固化（冷坩埚）工艺中试。第二阶段（2025～2040年）：建设热堆乏燃料第二座商用后处理厂（采用先进后处理技术，包括兼容处理快堆 MOX 乏燃料及高放废液分离）和快堆金属合金燃料制造厂；建设高放废液固化工厂；完成干法后处理和熔盐循环示范试验。第三阶段（2040～2050年）：完成金属合金乏燃料后处理干法中试，并建设后处理厂；完成熔盐高放废物固化工艺中试并建设固化工厂。

本咨询主体结构完成于 2012 年 12 月，2017 年进入出版流程后进行了整理和部分修订，但并未对相关数据进行更新，因此可能存在时效性问题，特此说明。

柴之芳

2017 年 5 月

目 录

前言

第一章 关于我国核燃料后处理 / 再循环的一些思考	1
第一节 核燃料循环的两种方式	1
第二节 国内外核燃料后处理 / 再循环技术发展现状与趋势分析	7
第三节 我国核燃料后处理 / 再循环技术发展战略初步构想	12
第四节 我国核燃料后处理 / 再循环中的关键技术问题	14
第五节 结语	15
参考文献	15
第二章 国外先进核燃料循环后段技术发展动向	17
第一节 后处理技术发展概况及经验教训	17
第二节 国外先进后处理技术的发展动向	31
第三节 国外后处理对中国的启示	63
第四节 结语	65
参考文献	65
第三章 热堆和快堆乏燃料后处理技术分析	72
第一节 热堆和快堆乏燃料	74
第二节 水法后处理技术现状和发展趋势	76
第三节 干法后处理技术	83
第四节 水法和干法后处理技术优缺点比较分析	94
第五节 结论和建议	98

参考文献	99
第四章 快堆内循环研究.....	101
第一节 快堆及发展历程概述	101
第二节 不同循环模式下堆芯核素演变和分布的计算分析	102
第三节 铀资源利用率分析	110
第四节 快堆燃料对其中裂变产物含量限制要求的计算分析	119
第五节 快堆分别利用增殖和嬗变在内循环中的作用分析	120
第六节 结论和建议	125
参考文献	125
第五章 快堆燃料制造技术.....	127
第一节 快堆 MOX 燃料制造技术	127
第二节 快堆 U-Pu-Zr 金属燃料制造技术	146
第三节 ADS 燃料制造技术	152
第四节 我国快堆燃料发展规划建议	152
参考文献	156
第六章 快堆及其燃料循环技术经济性.....	157
第一节 快堆及其燃料循环概述	157
第二节 技术经济分析模型	160
第三节 经济性初步分析	166
第四节 其他效益	169
第五节 结语	172
参考文献	173
第七章 快堆高放废物.....	174
第一节 快堆高放废物的来源和种类	174
第二节 国外快堆高放废物处理研究现状	177
第三节 我国快堆高放废物研究现状分析和主要问题	183
第四节 建议	184
参考文献	185

第八章 钍铀燃料循环	186
第一节 概述	186
第二节 钍铀燃料循环的基本特点和运行模式	187
第三节 钍资源核能利用	192
第四节 钍铀循环水法后处理技术	195
第五节 钍基熔盐堆核能系统	200
第六节 展望和发展战略建议	216
参考文献	217
第九章 核燃料循环中的新方法、新材料和新技术	221
第一节 国际发展动向	221
第二节 我国核燃料循环对新材料、新技术的重大需求	259
第三节 我国的现况和主要问题分析	261
第四节 具体建议的研究方向和领域	268
参考文献	273

第一章 关于我国核燃料后处理 / 再循环的一些思考 *

核能作为一种能量密度高、洁净、低碳的能源，在确保能源安全、缓解环境压力从而实现我国经济和社会可持续发展方面肩负着双重使命。我国《核电中长期发展规划（2005～2020年）》指出，核电建设要强调安全和高效。这进一步明确了我国核电发展的方向。

核燃料循环是核能系统的“大动脉”，为了确保我国核能的安全高效可持续发展，必须建立一个独立、完整和先进的核燃料循环工业体系。充分利用核能资源，实现核废物的最少化和安全处置，是核能可持续发展的基本要求。快堆及其闭式燃料循环可以满足上述要求，符合核裂变能可持续发展战略。

与发达国家相比，我国的核电发展起步较晚，核燃料循环技术在总体上比较落后。我国在核燃料循环前段已经具备了工业生产能力，基本上能满足我国核电当前和近期的需要，但生产规模有待于进一步扩大，技术水平有待于进一步提高。我国核燃料循环后段尚未形成工业能力，这是我国核工业体系中最薄弱的环节。核燃料循环后段实质上就是快堆核燃料循环，包括热堆乏燃料后处理、快堆燃料制造、快堆乏燃料后处理、高放废物处理与处置等。快堆核燃料循环对核裂变能的可持续发展至关重要，也是我国核能系统中的薄弱环节。本章侧重探讨快堆核燃料循环系统中的核心问题，即核燃料的后处理 / 再循环技术问题。

第一节 核燃料循环的两种方式

一、核燃料循环概念

核裂变能系统的核燃料循环〔本章讨论钚（Pu）-铀（U）循环〕指从铀矿开采到核废物最终处置的一系列工业生产过程，以反应堆为界分为前段和后段。核燃料循环分为闭式循环（closed fuel cycle）和一次通过循环（once-through

* 本章由柴之芳、顾忠茂撰写。

cycle)。两种循环方式在核燃料循环前段没有差别,均包括铀矿勘探开采、矿石加工冶炼、铀转化、铀浓缩和燃料组件加工制造。

两种循环方式的差异在燃料循环后段:闭式循环包括从反应堆中卸出的乏燃料中间储存、乏燃料后处理、回收燃料(Pu和U)再循环、放射性废物处理与最终处置。回收燃料可以在热中子堆(热堆)中循环,也可以在快中子堆(快堆)中循环。如图1-1所示,图中左侧表示热堆(主要是轻水堆,light water reactor, LWR)闭式循环,右侧表示快堆(fast reactor, FR)或ADS闭式循环。对于一次通过循环,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。

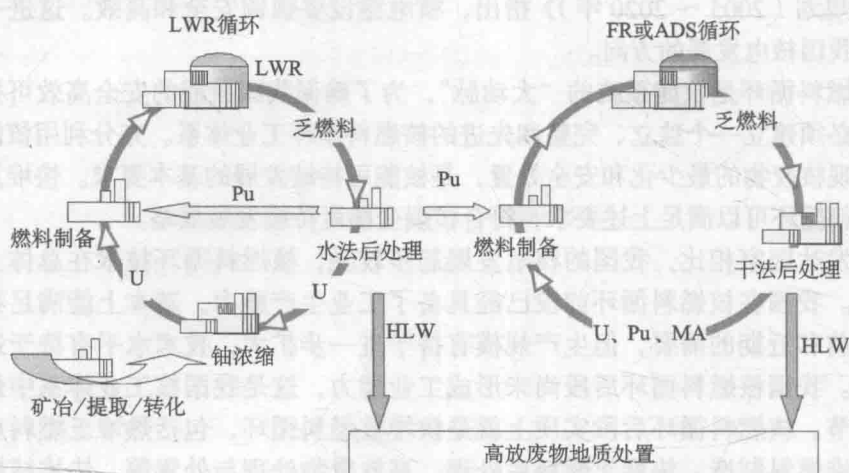


图 1-1 热堆闭式循环与快堆闭式循环示意图

U: 铀; Pu: 钚; MA: 次锕系元素; FR: 快堆

二、核燃料一次通过循环方式的问题

核燃料一次通过循环是最为简单的循环方案,在铀价较低的情况下较为经济,也有利于防止核扩散。但该方案存在以下问题。

(一) 铀资源不能得到充分利用

一次通过循环方式的铀资源利用率约为 0.6%,而乏燃料中约占 96% 的铀和钚被当作废物进行直接处置,造成严重的核燃料资源浪费。地球上已查明的常规铀资源(低于 130 美元/kg)约为 $7.63 \times 10^6 \text{t}$,待查明的常规铀资源约为 $1.0 \times 10^7 \text{t}$ (Hanly and Vance, 2014)。据 IAEA 预测,2050 年全世界核电装机容量将从 2011

年的 $370\text{GWe}^{\text{①}}$ 提高到 1500GWe (中值)(IAEA, 2001)。这意味着, 如果采用一次通过循环方式, 地球上的常规铀资源仅能使用 $60 \sim 70\text{a}$, 无法满足全球核能可持续发展的需要。

(二) 需要地质处置的废物体积太大

将乏燃料中的废物(裂变产物和次锕系元素)与大量有用的资源(铀、钚等)一起直接处置, 将大大增加需要地质处置废物的体积。即使按照全世界目前的核电站乏燃料卸出量(每年约 $1 \times 10^4\text{t}$ 重金属)估算, 一次通过循环方式需要全世界每 $6 \sim 7\text{a}$ 就建造一座规模相当于美国尤卡山核废物处置库(设计库容 $7 \times 10^4\text{t}$ 重金属)的地质处置库。只要全世界核电装机容量增加 1 倍, 则就需每 $3 \sim 4\text{a}$ 建设一座地质处置库, 这显然是难以承受的负担。

(三) 对环境安全构成长期威胁

由于乏燃料中包含了大量放射性核素, 其长期放射性毒性很高, 要在处置过程中衰变到天然铀矿的放射性水平, 将需要 10^5a 以上(如图 1-2 最上方曲线所示), 如此漫长的时间尺度带来诸多不可预见的安全不确定因素。所以, 一次通过方式对环境安全的长期威胁极大。

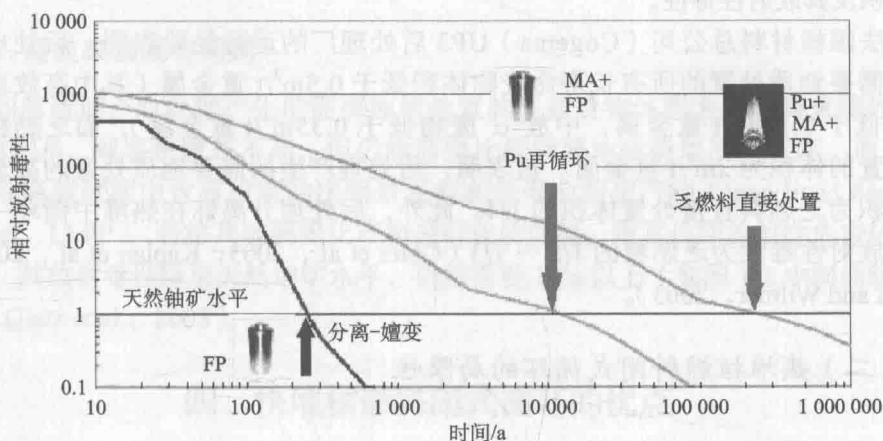


图 1-2 不同核燃料循环方式下高放废物放射性毒性随处置时间衰减情况

资料来源: Glatz 等(2003)

① e 指电功率。