



中国原子能科学研究院科学技术丛书

快堆嬗变技术

周培德 主编



中国原子能出版社

中国原子能科学研究院科学技术丛书

快堆嬗变技术

周培德 主编



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

快堆嬗变技术 / 周培德主编. —北京:中国原子能出版社,2015. 10
ISBN 978-7-5022-6913-5

I. ①快… II. ①周… III. ①快堆—嬗变—研究
IV. ①TL423 ②TL92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 254332 号

内 容 简 介

本书较系统地介绍了长寿命次锕系核素(简称 MA)嬗变的理论知识和采用快堆嬗变的相关工程技术知识,并一定程度上反映了中国原子能科学研究院在快堆嬗变基础研究和应用研究方面的科研成果。全书共分七章:嬗变概述、分离-嬗变对象目标和快堆嬗变研究概况、快堆中子能谱和中子经济性、嬗变对快堆中子学的影响、快堆含 MA 燃料的特性、快堆嬗变堆芯设计、先进燃料循环模式及快堆嬗变情景等。本书以钠冷快堆作为嬗变装置的例子,论述相关的技术特点、设计考虑和嬗变实施情景。对于采用其他装置进行嬗变,本书有些内容是共性的,有些内容可作为参考。

本书可供核能科学技术领域的技术人员参考,可供核能科学与工程、核燃料循环等专业的研究生、高等院校有关专业师生参考,同时也可供对核能发展战略、核能可持续发展等问题关注的核能行业和产业管理工作参考。

快堆嬗变技术

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 王 青
装帧设计 崔 彤
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15.75
字 数 318 千字
版 次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-6913-5 定 价 88.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn> E-mail:atomep123@126.com
发行电话:010-68452845 版权所有 侵权必究

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

出版委员会

主任 万 钢

副主任 周刘来 柳卫平

委员 (按姓氏笔画为序)

王国保	尹忠红	叶宏生	叶国安	刘振华	刘峻岭
刘森林	李育成	李和香	李树源	张天爵	张东辉
张生栋	陈 凌	陈东风	邵焕会	罗志福	岳维宏
赵志祥	姜兴东	柯国土			

编审委员会

顾问 (按姓氏笔画为序)

王方定	王乃彦	方守贤	阮可强	张焕乔	周永茂
徐 铎	钱绍钧	樊明武	潘自强		

主任 赵志祥

副主任 柳卫平

委员 (按姓氏笔画为序)

于伟翔	王明政	王仲文	王修龙	尹邦跃	刘一兵
刘大鸣	刘森林	汤秀章	杜开文	李志宏	杨红义
杨启法	吴继宗	何 辉	何高魁	肖雪夫	张天爵
张伟国	林 敏	赵永刚	赵守智	罗志福	季松涛
周培德	郑卫芳	姜 山	胡石林	侯 龙	顾忠茂
黄 晨	韩世泉	葛智刚	喻 宏		

丛书办公室

主任 尹忠红

副主任 李来霞

成员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王宝金	伍险峰	张小庆	张徐璞	骆淑莉
韩翠娥					

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 李 涛

副主任 赵志军 谭 俊

委 员 (按姓氏笔画为序)

王 朋 李 宁 李 涛 张关铭 赵永刚 赵志军 谭 俊

编辑工作小组

组 长 谭 俊

副组长 王 朋

成 员 (按姓氏笔画为序)

王 朋 王 青 付 凯 李 宁 张关铭 侯茸方 谭 俊

总 序

中国原子能科学研究院创建于 1950 年,是我国核科学技术的发祥地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了 7 位“两弹一星”功勋科学家和 60 多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学与技术 and 物理学两个一级学科硕士、博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5 本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会

2005 年 9 月 1 日

前 言

核能的开发利用和人类的生活、生产活动一样都会产生废物,特别是放射性废物。放射性废物是含有放射性核素或被放射性核素所污染的废物,其浓度或活度大于国家规定的清洁解控水平,并且预期不再被利用的物质。《中华人民共和国放射性废物安全管理条例》将放射性废物分为豁免废物、极低水平放射性废物、低水平放射性废物、中水平放射性废物、高水平放射性废物和 α 放射性废物。

放射性废物的安全处理、安全处置,特别是高水平和 α 放射性废物的安全处置,关系人类健康、社会与环境安全,已成为影响核能大规模可持续发展的几个关键问题之一。2003年6月28日,我国颁布的《中华人民共和国放射性污染防治法》提出了高放废物与 α 废物集中深地质处置和低中放废物区域性近地表处置的基本要求。地质处置是国际普遍认同的处置高放废物的方法,即在深几百米和上千米的稳定地层中,采用工程屏障和天然屏障相结合的多重屏障隔离体系将高放废物和 α 废物与人类生物圈长期安全隔离。

高放废物主要指反应堆或核电厂的乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体;如实行一次通过式燃料循环策略,则乏燃料本身就是高放废物;如实行几次甚至安全闭式燃料循环策略,则高放废物的体积虽然不足核燃料循环所产生的放射性废物体积的百分之一,但其放射性活度却占核燃料循环总放射性活度的99%以上。由于高放废物具有放射性强、释热率高、半衰期长和毒性大等特点,必须采取措施使它们长期(几万年甚至几十万年)与人类生存环境安全、可靠地隔离,或者在相对短的时间内(比如千年)其影响就可下降到某个水平,之后对生物圈产生的辐射等影响接近天然水平。

高放废物对人类和环境的长期潜在危害主要来源于其中的锕系元素,特别是超铀元素,也包括一部分半衰期特别长的裂变产物。为降低高放废物的长期潜在危害影响,20世纪七十年代提出了分离-嬗变概念

(partitioning and transmutation, P&T 或 P-T),即通过化学分离把高放废物中的超铀元素和长寿命裂变产物分离出来,再制成燃料元件或靶件放置到反应堆装置中,通过核反应使之嬗变成短寿命核素或稳定核素。由于分离之后高放废物中的超铀元素及长寿命裂变产物的含量大幅度减少,这样的高放废物将在相对短时间(比如百年或千年)内其放射性毒性就可以下降到天然铀矿石的当量放射性毒性水平。高放废物的分离-嬗变是实现高放废物最小化的有效途径。通过分离-嬗变可以大幅度减少高放废物中超铀元素和长寿命裂变产物的含量,降低高放废物的长期毒性和长期危害,减少需要深地质处置的高放废物量,降低公众对高放废物地质处置长期安全性和长远风险性的忧虑。

高放废物的长期放射性毒性主要来自钚、次锕系元素(Minor Actinides,缩写为 MA,主要包括 Np、Am、Cm 等)、长寿命裂变产物核素(long-lived fission products,缩写为 LLFP,主要包括⁹⁹Tc、¹²⁹I 等)的贡献。分离-嬗变是相互衔接的两个环节。乏燃料后处理时,在后处理流程中进行长寿命核素的分离,并且要求去污因子达到一定水平,使高放废液中的长寿命核素的量低于某一水平,把这种高放废液固化后再进行深地质处置。分离出的长寿命核素需进行嬗变。对于可用于长寿命核素嬗变的装置,其嬗变的效率有差别,但一个完整的辐照周期内嬗变掉的长寿命核素的量都是有限的,经过一定时间辐照后,含长寿命核素的靶件或组件还需要进行后处理,以分离出剩余的长寿命核素,再做成燃料并放入装置中再次辐照。分离-嬗变需要多次循环,在每次循环中都会产生需要固化处理的高放废液。实际上,锕系元素的完全循环是不可能的,环节多及流程的复杂性使得在实施 P&T 过程中,Pu、MA、LLFP 等会或多或少地损失掉,并且会不可避免地产生二次废物。分离-嬗变是减少高放废物深地质处置长期风险的中间技术,而不是后者的替代方案,最终还是有一定数量的高放废物需要进行地质处置。

核素的嬗变需要辐照场。光子及亚原子粒子束轰击靶原子核,可引起核反应,将一种原子核转变(嬗变)为另一种原子核。中子在物质中的穿透能力强,与原子核反应无需克服库仑势垒,因此各种能量的中子都可引起核反应。对于同一类核反应,不同核素、不同的中子能量,反应截面(概率)相差很大,这就为选择性嬗变提供了可能。中子可通过现有的裂

变反应堆、未来的聚变反应堆,以及加速器驱动的次临界系统(Accelerate Driven Sub-critical System, ADS)获得,是实现工程规模嬗变的唯一轰击粒子。裂变反应堆包括热中子反应堆和快中子反应堆(简称快堆)等。对于长寿命裂变产物,主要选择用热中子堆进行嬗变,也可在快堆中设置出慢化区,在慢化区嬗变。钚和所有的次铀系核素在快堆中都可裂变,可选择用快堆嬗变超铀元素。钚和次铀系核素在快堆中多次循环的限制因素相对少。快堆的工程技术已比较成熟,国际上有建造和运行快堆实验堆和快堆核电站的实践和经验。快堆的嬗变效率比较高,是当前可用于工程规模嬗变的现实装置,受到发展核能国家的重视。

本书重点论述快堆嬗变的主要技术要素及近期研究成果。为了更好地让读者了解和理解嬗变技术,本书介绍了嬗变概念、分离-嬗变对象的确定、分离的目标要求、可用于嬗变的装置、采用不同冷却剂的快堆的中子谱、快堆嬗变的中子经济性、嬗变对快堆安全的影响、含嬗变对象的燃料、快堆嬗变的设计、快堆的嬗变能力、在核能发展中快堆嬗变的情景等方面的内容,力求进行较系统的论述。对于采用其他装置进行嬗变,上述有些内容是共性的,有些内容应进行针对性的考虑或研究,在考虑或研究时可参照快堆嬗变技术要求及嬗变情景,以获得在核能系统中采用这类装置进行嬗变的主要技术因素和总体效果评估。

第1章讲嬗变概述。介绍嬗变的概念、燃料循环的概念、嬗变的方法以及分离-嬗变技术的简要发展历史。分离-嬗变是实施核燃料循环的目的之一,也是先进核燃料循环的重要技术特征。分离是实施嬗变的基础。将需要嬗变的对象分离出来后,下一步就是如何嬗变的问题。由铀系核素燃料链可见,对不同中子能谱的中子场,铀系核素都有一定比例裂变掉,有一定比例转化成其他铀系核素,可用于核素嬗变的设施主要包括热中子堆、快中子堆、聚变裂变混合堆、ADS、聚变堆等。分离-嬗变概念早在20世纪六十年代就提出来了,但其发展经历了较曲折的过程,当前仍处于技术风险进一步确认和工程技术研发阶段。

第2章介绍分离-嬗变对象目标和快堆嬗变研究概况。包括嬗变对象、分离目标、分离技术现状和国外快堆嬗变研究设计概况等内容。分离-嬗变效果的最终衡量指标是系统循环过程中产生的高放废物的量及其放射性毒性下降到当量水平的时间。如何确定分离-嬗变对象是首先

要考虑的问题。自 20 世纪七十年代提出分离-嬗变概念以来,嬗变对象已大致确定了一个问题。嬗变对象的确定涉及对放射性半衰期、放射性毒性、该核素进入环境后会不会形成单价离子、环境中有没有该核素的天然稳定同位素作稀释剂、多长时间作为截止时间等方面综合考虑。截止时间是衡量深地质处置库保证完整性的时间,在截止时间后可假设深地质处置库部分失去完整性,如贮存在其中的高放废物的放射性毒性此时已下降到某一当量水平,则这种完整性散失带来的潜在放射性危害可接受。如截止时间取一千年,某种放射性核素在一千年内就衰变到相对低的水平,则这种放射性核素就可以不作为嬗变对象。放射性半衰期和放射性毒性水平是放射性毒性的主要衡量因素。但由于放射性毒性可采用不同的指标来衡量,另外,放射性核素进入环境在生物圈中的迁移行为和影响评估有较大不确定性,研究也不够充分,这导致嬗变对象中各放射性核素的重要度排序在不同时期可能发生变化。在嬗变对象确定后,需考虑把这些核素从乏燃料中分离出来的相关指标要求,一般用去污因子来衡量,即考虑高放废液分离时对这些核素的分离去污水平。基于当前的认识水平,国际上比较一致地认为 MA 拟作为重点衰变的对象,在实施 MA 衰变的同时,也拟实施¹²⁹I 和⁹⁹Tc 的嬗变。截止时间也是确定嬗变对象及其去污因子要求的敏感因素。对于 MA 的嬗变,本章最后介绍了国外基于快堆作为嬗变装置的研究设计概况。

第 3 章介绍快堆中子能谱和中子经济性。世界上快堆技术与热堆技术基本上同时起步发展。快堆的发展已超过半个世纪,到目前为止,全世界总共建成 22 座快堆,其中采用钠作冷却剂的有 18 座,包括我国 2011 年建成的中国实验快堆。快堆是由平均中子能量约 0.1 MeV 的快中子引起原子核裂变链式反应的反应堆。快堆按冷却剂可分为钠冷快堆、铅(铋)冷快堆,气冷快堆等。熔盐堆堆芯也可设计成快中子谱。中子能谱是决定嬗变特性的关键因素。本章给出了几种典型快堆的归一化中子能谱。一个装置的嬗变能力取决于其能够提供的剩余中子数,同时,与嬗变该核素所需消耗的中子数有关,即在给定的中子场中把嬗变对象及其俘获反应产物、衰变产物转化到所要求的最终状态(通常指裂变掉)所需的中子数。该参数与具体核素及中子场特性(通量水平和中子能谱)密切相关。

第4章介绍嬗变对快堆中子学的影响。结合快堆中子学特点、中子与原子核的相互作用、反应堆动力学基础、反应性效应和反应性系数的基本原理介绍,分析嬗变对所讨论的中子学的影响。快堆的主要中子学特点可以概括为中子能谱硬、中子平均能量高及燃料富集度高等。在中子与原子核相互作用的部分,重点介绍中子与嬗变核素相互作用的特点,主要是MA核素的俘获和裂变特性,这些特性是后续反应性效应的分析基础。反应堆动力学基础主要是关于缓发中子效应的介绍,给出主要易裂变核素和MA核素的缓发中子参数。MA核素添加至堆芯后,对反应堆反应性效应与反应性系数有影响,选择对反应堆比较重要的几项参数进行了分析,包括燃料温度系数、钠密度系数、钠空泡反应性效应、燃料反应性效应、温度和功率反应性效应等。结合前述MA核素截面特性和缓发中子参数,分析MA核素对这几项反应性效应的影响,并给出定性结论,用于指导快堆嬗变设计。

第5章介绍快堆含MA燃料的特性。反应堆中工况环境最恶劣的地方是堆芯燃料组件。与热堆相比,快堆内的中子通量密度、燃料以及温度都更高。在快堆堆芯结构材料选择和制造工艺上提出更为严格的要求。在燃料中添加MA,将使燃料芯体、燃料元件等的物理性能、热工性能和辐照性能有所改变。快堆嬗变使用的燃料一般可以分为两种形式,一种是将MA均匀混合到燃料中;另一种是将待嬗变的材料制成靶件,类似燃料组件形式。本章描述添加MA核素的各种燃料的基本性质,燃料制造工艺以及辐照实验的基本情况。最后,针对大型钠冷快堆,如用它嬗变,给出使用添加MA燃料后的堆芯成分变化,并评估燃料组件中添加MA核素后贮存和运输的特殊要求。

第6章介绍快堆嬗变堆芯设计。本章介绍基于钠冷快堆技术的MA和LLFP嬗变堆芯设计方案和特征。基于MA和LLFP基本中子物理特性的考虑,其在快堆中进行嬗变的方式是不同的。吸收中子并发生裂变反应是MA最佳的嬗变方式。在快堆中进行MA嬗变有几种不同的方式,目前认为较可行的是在堆芯燃料中均匀添加少量MA的均匀嬗变方式和将含MA燃料制作成特殊靶件并在堆芯选定位置进行辐照的非均匀嬗变方式。这两种MA嬗变方式各有优缺点。LLFP嬗变主要依靠吸收中子发生辐射俘获反应,适当的中子能谱能够增加此种反

应的概率。LLFP 嬗变不能产生新的中子,完全是一个消耗中子的过程。快堆对于 LLFP 嬗变主要的优点在于每次裂变的剩余中子数多,可以用来进行 LLFP 的嬗变,同时堆芯中的中子通量密度高。但是,快堆堆芯中子能谱较硬,即便是利用泄漏中子直接对 LLFP 进行嬗变也是不经济的,需要进行能谱优化。能谱优化主要是对快中子进行适当慢化,能谱慢化涉及到慢化材料和慢化方式的选择。利用快堆泄漏中子并进行适当能谱优化能够实现 LLFP 的有效嬗变。

第 7 章介绍先进燃料循环模式及快堆嬗变情景。分离-嬗变要通过核能系统中的后处理、燃料制造、快堆等环节来实施。而核能系统的发展是为满足核能作为主力能源之一,能大规模、可持续利用。本章主要研究在这样的系统采用何种策略来实施分离-嬗变?系统如何组成和发展?本章介绍了几个主要发展核能国家的燃料循环策略,并基于我国的核能发展目标,给出了可实施分离-嬗变的核能系统的发展情景图。

本书编写组成员包括周培德、胡赞、杨勇、杨晓燕、张坚、张强、王事喜、周科源、杨佳音、吴明宇和陈仪煜。本书在编写中力求做到基础性、系统性,尽量采用由中国原子能科学研究院研究开发的成果和数据。为此,本书以钠冷快堆嬗变为例子,系统阐述嬗变相关的方面,并尝试从核能系统这一高度来论述嬗变问题。本书利用了编写组成员与嬗变有关的博士论文研究成果、编写组成员负责或参与的研究课题或设计研究项目的部分成果。

在书稿的撰写、审稿和出版过程中,中国原子能科学研究院徐铄院士和马大园研究员审阅了全书并提出了宝贵意见。中国原子能科学研究院快堆研究设计所的研究生王静、霍兴凯、王凤龙、单浩栋等编排了书中的部分图、表,参与部分文献资料翻译和设计方案计算工作。中国原子能科学研究院科技信息部尹忠红主任、李来霞副主任对本书的写作和成稿给予了很大帮助。在此一并表示诚挚的谢意。

由于编写组水平有限,引用的文献可能标注不全,还请包容谅解。书中认识不足、不妥和错误之处在所难免,敬请读者与同行批评指正。

编写组

2014 年 10 月 24 日

目 录

第 1 章 嬗变概述	(1)
1.1 嬗变概念	(1)
1.2 核燃料循环	(2)
1.3 嬗变方法	(4)
1.3.1 热堆嬗变	(11)
1.3.2 快堆嬗变	(12)
1.3.3 聚变裂变混合堆嬗变	(12)
1.3.4 加速器驱动次临界系统(ADS)嬗变	(13)
1.4 分离-嬗变技术发展历史	(14)
参考文献	(16)
第 2 章 分离-嬗变对象目标和快堆嬗变研究概况	(19)
2.1 嬗变对象	(19)
2.1.1 乏燃料中核素成分	(19)
2.1.2 放射性核素的毒性	(22)
2.1.3 其他因素	(30)
2.2 分离目标	(33)
2.3 分离技术现状	(35)
2.4 国外快堆嬗变研究设计概况	(37)
参考文献	(39)
第 3 章 快堆中子能谱和中子经济性	(40)
3.1 快堆发展简况	(40)
3.2 中子能谱	(44)
3.2.1 压水堆	(46)
3.2.2 钠冷快堆	(47)
3.2.3 铅冷快堆	(52)
3.2.4 气冷快堆	(55)
3.2.5 熔盐堆	(59)
3.3 中子经济性	(61)
3.3.1 嬗变基本原理	(61)

3.3.2	嬗变装置的选择依据	(61)
3.3.3	快中子谱的优势	(62)
	参考文献	(65)
第4章	嬗变对快堆中子学的影响	(67)
4.1	快堆中子学特点	(67)
4.2	嬗变影响分析条件	(68)
4.2.1	主要 MA 核素	(68)
4.2.2	参考堆芯	(68)
4.2.3	计算参数	(69)
4.3	中子与原子核的相互作用	(69)
4.3.1	中子	(70)
4.3.2	中子与原子核相互作用的机理	(70)
4.3.3	中子截面与核反应	(71)
4.3.4	中子核反应	(73)
4.4	反应堆动力学基础	(80)
4.4.1	不考虑缓发中子的动力学	(81)
4.4.2	缓发中子效应	(81)
4.4.3	主要核素的缓发中子参数	(82)
4.5	反应性效应和反应性控制	(84)
4.5.1	反应性系数	(84)
4.5.2	温度和功率反应性效应	(90)
4.5.3	钠空泡反应性	(92)
4.5.4	燃耗反应性效应	(93)
4.5.5	有效缓发中子份额和中子寿命	(96)
4.5.6	控制棒	(98)
	参考文献	(100)
第5章	快堆含 MA 燃料的特性	(101)
5.1	快堆燃料及快堆含 MA 燃料简介	(101)
5.1.1	快堆燃料简介	(101)
5.1.2	含 MA 燃料简介	(103)
5.2	均匀添加 MA 燃料	(104)
5.2.1	氧化物燃料	(105)
5.2.2	金属燃料	(113)
5.2.3	碳化物燃料	(118)

5.2.4	氮化物燃料	(120)
5.3	含 MA 非均匀燃料	(122)
5.3.1	弥散体燃料	(123)
5.3.2	Vibro-pac 和 Sphere-pac 燃料	(128)
5.4	含 MA 燃料组件的运输及贮存	(129)
5.4.1	辐射强度	(129)
5.4.2	辐射剂量率	(132)
5.5	小结	(133)
	参考文献	(137)
第 6 章	快堆嬗变堆芯设计	(139)
6.1	概述	(139)
6.2	快堆嬗变 MA 堆芯设计	(139)
6.2.1	嬗变指标定义	(140)
6.2.2	参考快堆堆芯方案简介	(141)
6.2.3	均匀添加模式	(142)
6.2.4	超铀核素(TRU)整体循环模式	(145)
6.2.5	非均匀添加模式	(151)
6.2.6	燃料成分及装载量	(161)
6.2.7	嬗变专用快堆堆芯设计	(164)
6.3	快堆嬗变 LLFP 方案设计	(173)
6.3.1	LLFP 核素的基本特点	(173)
6.3.2	快堆泄漏区中子场的特征	(174)
6.3.3	⁹⁹ Tc 和 ¹²⁹ I 核素的嬗变特性	(176)
6.3.4	小结	(185)
6.4	MA 嬗变对反应堆放射性源项的影响	(186)
6.4.1	计算使用的反应堆设计方案	(186)
6.4.2	源项	(187)
6.4.3	小结	(197)
	参考文献	(197)
第 7 章	先进燃料循环模式及快堆嬗变情景	(201)
7.1	核能发展	(201)
7.2	先进燃料循环模式	(206)
7.2.1	燃料循环模式	(208)
7.2.2	燃料循环策略	(210)

7.3 我国燃料循环模式及快堆嬗变情景研究 (217)

7.3.1 我国核能发展战略 (217)

7.3.2 燃料循环模式研究 (218)

7.3.3 核能系统中 MA 总量控制建议 (236)

参考文献 (236)

第 1 章 嬗变概述

1.1 嬗变概念

经过半个多世纪的发展,世界上核能发电已发展到相当规模,按世界平均水平计算,当前核能年发电量已达到总发电量的 17% 左右。进入 21 世纪后,因二氧化碳(CO_2)减排和调整能源结构等重大问题,核能的发展出现新机遇;同时,因核安全、放射性废物的环境影响、核扩散等重大问题,核能的发展面临重大挑战。正是在这种机遇和挑战并存的背景下,本世纪初提出了第四代先进核能系统概念。

第四代先进核能系统有明确的目标,包括可持续性、经济性、安全性和可靠性及防扩散和实体防卫等方面的目标。其中,可持续性目标的具体要求是:能提供清洁、可持续的核能;能为世界长期使用,对核资源实现有效利用;能有效处理核废物,并使核废物最小化,特别是减少核废物长期管理的负担,从而保证对公众和环境的保护。核废物(放射性废物)的安全处理、安全处置,特别是高水平 and α 放射性废物的安全处置,不仅关系人类健康、社会与环境安全,而且也是影响核能未来发展的重大问题。

高放废物主要指乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体,如实行一次通过策略,则高放废物也包括乏燃料。高放废物的体积虽然不足核燃料循环所产生的放射性废物体积的百分之一,但其放射性活度却占核燃料循环总放射性活度的 99% 以上。由于高放废物具有放射性强、释热率高、半衰期长和毒性大等特点,应采取措施使它们长期(几万年甚至几十万年)与人类生存环境完全、可靠地隔离,长期风险可控。

为解决高放废物长期放射性影响,早在 20 世纪七十年代就提出了分离-嬗变概念,即通过化学分离把高放废物中的次锕系元素和长寿命裂变产物分离出来,再制成燃料元件或靶件送往反应堆或加速器中,通过核反应使之嬗变成短寿命核素或稳定元素。这使来自后处理设施的放射性废物将在相对短(比如几百年至几千年)时间内,衰变到低于天然铀矿石的当量放射性毒性水平。高放废物的分离-嬗变是实现高放废物最小化的一个工程技术可行的有效途径。通过分离-嬗变可以极大地减少高放废物中锕系元素和长寿命裂变产物的含量,降低高放废物的毒性和危害,减少需要深地层处置的废物量,消除公众对高放废物长期处置安全性的忧虑。