

· 研究进展 ·

“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划结题综述

李会红^{1*} 石伟群² 詹文龙³ 柴之芳² 董国轩¹

1. 国家自然科学基金委员会 数理科学部, 北京 100085
2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049
3. 中国科学院, 北京 100864

[摘要] 本文介绍了国家自然科学基金“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划的立项背景、总体科学目标、总体布局、实施思路及总体完成情况,并提出了该领域的下一步发展建议。

[关键词] 重大研究计划;核裂变能;加速器;反应堆;核安全;核材料

核燃料的增殖和嬗变问题是先进核能体系的关键问题,是核能可持续发展的核心,是核燃料长期供应和安全的基础,既具有基础科学意义,又具有重要应用前景。核燃料增殖是指反应堆中产生的易裂变材料多于消耗的材料,涉及核燃料的组成及其核裂变过程。嬗变是指先进燃料循环中一种核素通过核反应转化为另一种核素的过程,关系到放射性废物的最小化及最终处置的长期安全性。我国能源结构正处于转型阶段,核电的积极发展给核能科学带来了巨大的机会和挑战。先进核裂变能的燃料增殖与嬗变研究取得了一系列重要的成果,培养了大批人才队伍,有效地支持了先进核裂变能的开发利用,促进了国家中长期能源战略规划的发展。

1 立项实施情况

1.1 立项背景

目前,我国的能源结构正处于由高碳能源向低碳能源过渡的战略转型关键期,积极发展核电清洁能源已成为国家中长期能源发展规划的战略之一。核能将与水能、风能、太阳能等可再生能源一起为我国能源结构的战略转型发挥重要作用。核燃料的长期稳定供应机制和放射性废物的安全处置措施是核能发展的两大需求,而核燃料的增殖与嬗变恰是满足上述需求的关键技术。

随着核能第三代堆型的成熟应用,“第四代核能系统”提出了明确的发展目标:在2030年前建立“安



李会红 博士,国家自然科学基金委员会研究员,核物理学会第十三届常务理事,研究方向是高能物理实验,曾从事北京正负电子对撞机上的BES物理数据分析和建模研究,现任数理科学部物理科学二处副处长,主管基础物理、高能物理、核物理、等离子体物理等学科的基金项目。

全性、经济性、可持续发展性、防核扩散、防恐怖袭击”等方面都有显著提高的新一代核能系统。

国际上,核能发达国家正积极发展第四代核能系统,开展先进核燃料循环的相关研究,主要包括美国主导的第四代核能系统国际论坛、国际原子能机构领导的革新型核反应堆和燃料循环国际项目等,都涉及核燃料的增殖与嬗变关键技术的研究。拟通过分离铀和钚实现核燃料的增殖,实现铀资源利用率的大幅提高,使得天然铀的利用率可达到60%~70%;拟通过分离次锕系核素和长寿命裂变产物并将其嬗变,力求高放核废物最少化的目的。

在国内,铀的需求随着核电事业的迅速发展而急剧增加,产生的乏燃料积累量也将同步增加,当前采用的“一次通过”处理方式不仅浪费资源,还将导致乏燃料处理能力和处理空间的极限制约,最终必将影响我国核电战略的可持续发展。我国的钍资源相对比较丰富,若实现钍资源核能的开发与利用,可以扩大核能资源,还有利于防止核扩散、减少核废

料,同时缓解钚废渣排放造成的放射性环境污染。因此,深入研究核燃料的增殖与嬗变有助于实现第四代核能系统提出的“安全性、经济性、可持续发展性、防核扩散、防恐怖袭击”的目标。

自2011年起,中国科学院开始实施战略性核能先导专项,包括“ADS 嬗变系统”和“钚基熔盐堆系统”等,国家自然科学基金“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划的最终目标是推动两个先进核能系统的工程实践,鉴于国际上没有工程实践的先例,需要自主突破诸多关键技术与科学问题。国家自然科学基金“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划与中国科学院核能先导专项相呼应,重点瞄准先进核能系统卡脖子科学问题的突破,开展多学科交叉创新性研究,争取重大创新成果,探索和发展先进核裂变能体系中的新机理、新方法、新技术、新材料,为我国核能产业的可持续发展提供必需的科学依据、技术积累和人才支持^①。

1.2 总体科学目标

重大研究计划以先进核裂变能体系中核燃料增殖与嬗变研究为主线,紧密结合国家中长期核能发展规划,加强实验研究、促进理论与实验的结合、孕育新机理的产生。重点解决先进核能体系中的核燃料及其核过程、核燃料在先进反应堆燃烧过程中的基本行为及其增殖与嬗变和乏燃料后处理的新方法与新机理三个核心科学问题。总体科学目标是:

(1) 根据国内外研究现状和发展趋势以及国家能源发展中长期规划,围绕核燃料增殖与嬗变这一重大研究方向进行前瞻布局,开展创新性研究,争取重大创新突破。

(2) 探索和发展先进核裂变能体系中的新机理、新方法、新技术、新材料,培养和扩充高水平研究人才队伍,使我国在国际上该领域的前沿研究中占有一席之地。

(3) 为建立具有创新能力和自主知识产权的核能产业体系,提供必需的科学依据、技术积累和人才支持,从而支撑我国第三代核电的发展和实现我国在第四代核电研究中处于国际先进水平。

1.3 总体布局和实施思路

重大研究计划涉及核能科学的基本问题,目标明确、主线清晰,沿着核燃料增殖与嬗变过程中的主要环节,包括前段、堆内和后段,开展具体研究工作,

完全符合国家战略需求和科学发展需求,具有重要应用前景。

重大研究计划组织实施的总体布局遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路,围绕核燃料增殖与嬗变开展创新性基础研究,加强顶层设计,不断凝炼科学目标,积极促进学科交叉,培养创新人才。在若干重点领域和重要方向实现跨越发展,探索先进核裂变能体系中的新机理、新方法、新技术、新材料,提升我国相关领域的自主创新能力,支撑国家相关技术的发展。经过指导专家组的多次讨论,确定该重大研究计划拟在充分调研的基础上,将所研究的科学问题分为重点突破和研究探索两个层次。重点突破的科学问题指在若干年内可取得突破性进展的问题;研究探索的科学问题旨在研究计划执行期间打好基础,争取在今后实现关键性突破的科学问题。

根据项目的科学目标,该重大研究计划按两阶段实施。第一个阶段为启动及重点支持阶段(2010—2012年):重点布局,了解先进核能体系探索中的核燃料及其核过程、掌握核燃料在先进反应堆燃烧过程中的基本行为及其增殖与嬗变、乏燃料后处理的新方法与新机理,为下一阶段项目的集成与升华奠定坚实的人才和研究基础。第二个阶段为集成升华阶段(2013—2018年):在总结前一阶段研究成果的基础上,进一步凝聚科学问题,突出研究重点,发挥前一阶段优势项目的潜力,加强课题之间的直接合作、研究成果的集成和升华,提高研究计划的整体水平,推动跨越式发展。

在重大研究计划的实施过程中,为保证高质量地完成各个阶段的研究目标,采取了以下措施:强调指导专家组“顶层设计,科学指导”的职能,形成具有统一目标的项目群,实现国家重大需求和科学前沿有限目标的有机结合;明确管理工作组“协助专家、日常管理”的行政职能,协助专家组加强项目的立项审查,确保立项质量,定期对项目开展进度检查,便于指导专家组对该重大研究计划的运行状态进行动态分析;通过学术交流年会和小型高端专题研讨会促进和加强学科交叉与课题合作;强调国际学术合作与竞争,组织召开国际学术会议;采取科学评价,鼓励原始创新和培养交叉人才;推动数据收集与共享^②。

^① 国家自然科学基金委员会数学物理科学部.“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划实施规划书(内部报告)。

^② 国家自然科学基金委员会数学物理科学部.“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划总结报告、成果报告、战略研究报告(内部报告)。

1.4 项目集成与学科交叉情况

先进核能系统的研究涉及多个学科的交叉,包含了加速器物理、反应堆物理、中子物理学、热工水力学、结构力学、放射化学、核燃料与材料、测量与控制技术、计算机与仿真技术、安全分析与环境保护等。

重大研究计划实施以来,国内的传统核能研究单位与其它学科的专家学者开展合作,将非核能领域研究团队引入核能研究中,极大地推动了学科的交叉融合。核能放射化学与固相配位和超分子化学交叉融合,利用硼酸熔融过程中硼酸根聚合的高度复杂性以及对中心金属离子的识别能力,发现了三价镧系与镧系硼酸盐结晶产物的非连续性变化趋势^[1];核材料物理与计算物理和超级计算交叉融合,应用分子动力学模拟方法解析 1 100~1 400 K 温度范围内不同分子比重($\text{LiF}/\text{ThF}_4 = 20.0 - 0.5$)的动力学过程,计算结果与实验观测的配位结构及转变过程基本一致^[2];基于蒙特卡罗等方法和先进计算机技术的 SuperMC 程序交叉融合,实现了辐射输运、材料活化与辐照损伤的模拟计算,在功能和性能上赶超国际上成熟的蒙特卡罗模拟软件;同步辐射技术和离子束辐照技术等大科学装置的交叉融合,在材料表征和开发耐辐照材料中发挥了重要作用,利用同步辐射技术研究放射性核素与功能纳米材料的界面作用机理,深入解析放射性核素与功能纳米材料表面活性官能团形成配合物的配位结构^[3];将纳米技术引入先进核能研究领域,在石墨烯、碳纳米管等碳纳米材料上组装磁性氧化物,并利用等离子体诱导接枝技术在其表面可控接枝不同的聚合物,实现碳纳米材料的功能化^[4]。

重大研究计划指导专家组顶层部署的“连续波强流低能离子束的传输与加速”“基于颗粒流的 ADS 新型靶堆系统集成研究”“核用 SiCf/SiC 复合材料结构设计与离子辐照评价”“分离—嬗变先进核燃料循环中的镧系元素分离化学与方法研究”四个集成项目,为核能结构材料、加速器物理、反应堆物理与热工和放射化学培养了一批优秀的科研人员。

2 总体完成情况

重大研究计划指导专家组根据国内外研究现状和发展趋势,以及国家能源发展中长期规划,遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路,针对核燃料增殖与嬗变的科学问题组织前瞻性和交叉性的研究,不断凝练科学目标,积极促进学

科交叉,培养创新人才。在先进核裂变能的燃料增殖与嬗变新机理、新方法、新技术和新科学平台等方面获得了一批原创性成果和集成创新的成果,其中部分达到国际先进水平,填补了国内空白,对国家重大工程需求起到了重要的支撑和推动作用,同时提升了我国学者在该领域的学术地位和学术影响力。

重大研究计划布局培育项目、重点支持项目、集成项目以及战略研究项目共计 88 项,资助经费 1.9 亿元。其中培育项目 64 项,经费 5 120 万元;重点支持项目 17 项,经费 8 030 万元;集成项目 4 项,经费 4 800 万元;战略研究项目 3 项,经费 1 050 万元。

重大研究计划实施期间,共有 31 个依托单位获得资助,项目负责人为 85 人,其中正高级职称 67 人、副高级职称 18 人。项目成员中有 2 人当选中国科学院院士,1 人成为中青年科技创新领军人才,6 人获得国家杰出青年科学基金资助,6 人获得优秀青年科学基金项目资助,共培养博士研究生 122 名、硕士研究生 27 名,出站博士后 12 名。在该计划的支持下,我国在核能领域涌现了一批具有国际水准的优秀科学家,为我国的核能事业输送大量人才,支撑了我国核能的可持续发展。

在重大研究计划的资助下,研究群体在国际核心期刊上发表论文 1 449 篇,其中 SCI 收录 1 247 篇,EI 收录 926 篇;申请国内专利 190 项,国际专利 2 项;荣获国家自然科学奖二等奖 1 项、国家技术发明奖二等奖 2 项、省部级一等奖 6 项、二等奖 5 项;项目负责人在国际重要学术会议做特邀报告 80 余次。

2.1 先进核裂变能新机理研究

提出以颗粒流靶原理克服束流脉冲应力、液态金属腐蚀等效应引起的可用性问题,成功开发了自主知识产权的基于颗粒流靶的 ADS 设计模拟程序,建立了 ADS 系统设计专用数据库,研制了束靶耦合样机并完成了电子束打靶耦合验证^[5-8]。

开展 Ag/V 金属纳米多层膜制备与离子辐照的研究发现,小周期多层膜在界面吸收大量 He 原子并形成小气泡,而大周期多层膜在层内出现大尺寸气泡,原位观察到了多层膜界面吸收气泡的微观过程;在国际上率先研究了 CrN/AlTiN 陶瓷纳米多层膜的抗辐照性能,证明了陶瓷多层膜材料体系具有优异的抗辐照性能且其抗辐照性能依赖于周期厚度、证明了纳米孔道材料的优良抗辐照及气体释放能力,气体释放率最高可达 79%^[9]。

利用液态铅铋腐蚀实验装置和离子加速器,系统地获取了不同实验条件下 T91 钢的液态金属腐蚀和

辐照性能评价的实验数据,初步探明了铁素体/马氏体钢在液态金属和离子辐照环境中性能的退化机制,为新型抗辐照材料的成分设计提供了理论基础^[10]。

利用等离子体技术和纳米技术将功能有机分子修饰在纳米材料表面制备多种有机聚合物材料,构筑了新型功能性金属有机框架材料、二维过渡金属碳化物材料和纳米零价铁材料,提高了对放射性核素的高效和选择性富集能力。结合并利用同步辐射技术和理论计算化学方法,开展了放射性核素在纳米功能材料表面的化学形态和微观结构研究,在分子水平上阐明了作用时间、腐殖酸和微生物等对放射性核素在环境介质上化学形态的变化规律和作用机理,从理论上阐明了放射性核素的竞争性质和机理^[4, 11]。研究发现 CUO 分子中存在 CU 四重键,加深了铜系化合物中 5f/6d 电子成键特性的认识^[12]。

2.2 先进核裂变能新方法研究

铜系元素分离是实现分离-嬗变策略的前提。在铜系元素分离方面发展了基于二硫代次膦酸配体高效分离镧铜元素的溶剂萃取新方法(见图 1),并阐释了其内在分离机制,发现配位键的共价性和配位模式变化使得二硫代次膦酸配体具有高效的三价镧铜元素分离能力。其中镧系元素中 Am-241 去除率大于 99.998%,Am-241 中镧系去除率 99.2%,该技术指标属于国际领先水平^[13, 14]。发展了基于铋酸钠氧化 Am(III) 的高效 Am/Cm 分离新方法,原位合成了 NaBiO₃/SiO₂ 核壳型复合材料,在小型实验台架上进行了毫居级的 Am-241/Cm-244 分离验证实验,结果表明该材料对 Am/Cm 的相互分离系数大于 1 000,分离度大于 1.5^[15]。发展了基于活性 Al 阴极高温熔盐电解高效分离镧铜元素的新方法,该方法与传统的 Cd 阴极相比,镧铜分离因子提高了 1~2 个数量级。并利用高温原位 X-射线吸收谱、紫

外光谱、拉曼光谱等技术,研究了高温条件下熔盐体系在电解过程中元素的化学种态变化,首次发现了变价 An 元素的循环电解,并提出了消除该循环电解的方法,大幅度提高了电解过程的电流效率^[16, 17]。

开展了钍基熔盐堆设计分析软件体系的研究,包括核数据库制作、组件均匀化参数计算、堆芯与系统多物理耦合计算、燃料循环计算等多个功能;开发了钍基熔盐堆多功能栅格物理程序、多群数据库管理程序、核数据辅助加工程序以及先进反应堆时间相关物理热工耦合软件等多个工程应用软件;从耦合形式、耦合途径、网格匹配、耦合反馈模型、高效的数据交换模型、耦合收敛方式六大方面解决了钍基熔盐堆物理热工精确耦合问题^[18]。

提出了用于次锕系核素和长寿命裂变产物嬗变的 ADS 装置——HEIT-ADS 的概念设计。提出了 800 MW 热功率的 ADS 专用嬗变系统方案设计,优化了燃料装载方案、散裂中子源设计及冷却方案等,形成了可用于 ADS 嬗变机理研究和安全能力评价的优选方案,每年可以嬗变超过 300 kg 次锕系核素,嬗变能力达到了国际先进水平,为 ADS 安全运行和工业化嬗变提供重要参考^[19, 20]。

运用经典分子动力学方法对不同分子比重的 ThF₄-LiF 熔盐体系在 1 100—1 400 K 温度范围内的动力学行为进行了理论模拟。研究了 Th⁴⁺ 的配位变化规律以及各类输运性质,并拟合了第一配位层中的 F⁻ 的寿命和径向分布函数的经验公式。基于动力学模拟的结果,进一步采用密度泛函理论方法对优势配位结构进行了成键分析^[2]。在国际上率先将金属有机框架材料用于乏燃料后处理中的核素分离和治理易迁移性放射性核素污染,发现了一类新型耐辐照抗水解铜系晶态化合物,可阻滞铜系核素在环境中的二次迁移;突破了传统低价态镧系铜系元素化学

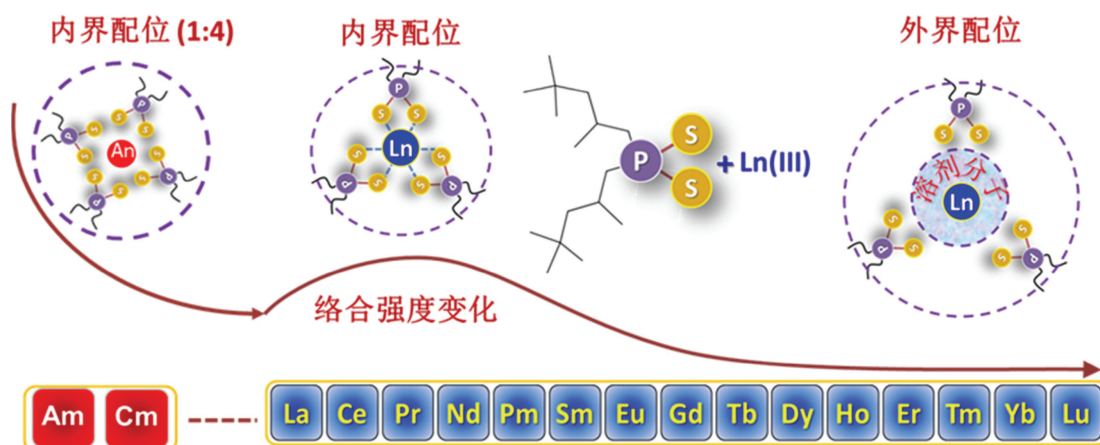


图 1 从热力学及配位模式差异角度阐释了纯化 Cyanex 301 对三价镧铜离子的选择性

性质极为相似的固有认识,初步提出了一种基于选择性结晶的低成本、高效、绿色的镭钍分离及镅钚分离策略用于降低乏燃料的长期放射毒性^[21, 22]。

2.3 先进核裂变能新技术研究

完成了散裂靶/堆靶耦合中子学分析和束流瞬变下散裂靶安全特性的分析,建立了 ADS 束流扰动分析体系,揭示了束流扰动对散裂靶和次临界堆的安全影响规律。针对铅铋次临界堆的需求,发展了三维中子输运程序,开发了高能中子数据库^[23-26]。

围绕先进核裂变能系统中的惰性基体燃料候选材料亟待解决的低温烧结、强韧化、离子/中子辐照、熔盐腐蚀等问题,成功实现了 ZrC、TiC、TiN 等陶瓷在 1600℃ 及以下的低温烧结。建立了先驱体合成、熔融纺丝、空气不熔化、高温烧成与烧结等 SiC 纤维制备平台以及相关产物结构与性能表征平台,打通 SiC 纤维制备流程(图 2)。通过分子结构设计获得了高铝碳化硅先驱体,自主设计了全套合成装备,连续碳化硅纤维突破 470 米,氧含量低于 0.3 wt%,提出了 1500℃ 无缝高强度连接方案^[27, 28]。

设计了新型合金 Si 型 9~12%Cr 铁素体/马氏体耐热钢和 9Cr-AlSi 合金,使合金在较低温度和氧分压情况下,能迅速形成具有保护性能的氧化膜。揭示相关改性材料的焊接接头组织和晶粒度对 LBE 腐蚀的影响机制,满足 ADS 系统中 550℃ 以下服役的散裂靶结构材料的技术要求^[29]。

以理论模拟与设计为基础,利用共结构导向法和后嫁接法将筛选的铜系阳离子识别配体的关键片段或类似物修饰到介孔氧化硅材料表面,成功制备出一系列对铜系阳离子具有良好吸附效果的功能化

介孔硅基材料;利用同步辐射技术和理论计算化学方法研究了铜系离子在介孔硅材料表面的化学形态和微观结构,从分子水平上阐明了铜系离子的竞争性性质与机理,为铜系固相吸附材料的设计制备奠定了良好基础^[30, 31]。

2.4 先进核裂变能新科学平台建设

在示范装置 ADS 超导直线加速器系统上(图 3),逐步实现了毫安级连续波强流低能离子束的稳定传输与加速,实现了连续波束流 15.8~16.3 MeV, 2.0~2.1 mA, 束流功率 32 kW 连续稳定运行超过 110 小时,束流可用性大于 89%,最大束流功率达到 45 kW^[32]。

针对 ADS 嬗变的中子学分析方法,建立了高精度、高效率的中子学设计和分析程序平台,利用该平台提出了次铜系核素和长寿命裂变产物的 ADS 专用嬗变装置概念,开展了嬗变机理和安全分析研究。建立了国际首台颗粒流散裂靶原理样机,验证了颗粒流散裂靶关键技术;测量了一系列的 ADS 系统设计用关键中子学数据,建立了具有自主知识产权的 ADS 系统设计专用关键核数据库;研发了自主知识产权的国际首个基于颗粒流的 ADS 靶堆系统级集成设计软件平台。

3 展望及未来发展建议

“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划的实施,以先进核裂变能体系中核燃料增殖与嬗变研究涉及的关键基础科学问题为核心,打破传统学科的壁垒,促进学科交叉和发展,取得了一批具有国际影响力的重要创新成果,提升了我国自主创新

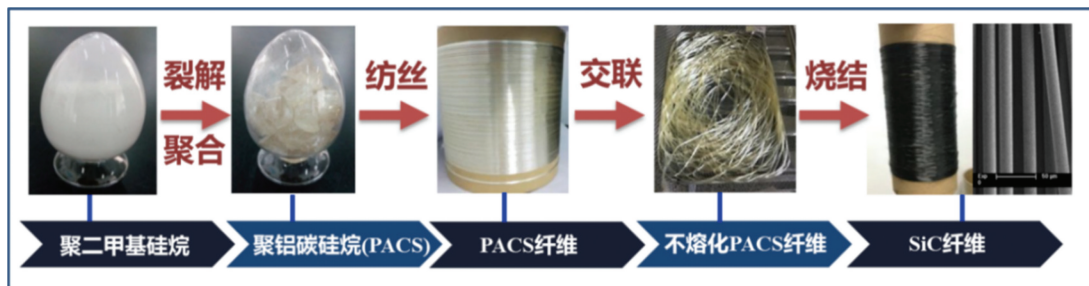


图 2 SiC 纤维制备流程



图 3 国际首台 ADS 超导直线加速器前端示范样机

能力,支撑了相关技术的跨越式发展。以跨学科的创新理论和源头创新方法为手段,培养了一批优秀学术带头人,形成了优秀的学术团队,突破了研究部门和研究方向的限制,形成了一批交叉学科的研究平台和团队,协同攻关核心科学问题,促进了多学科交叉耦合,增强了跨学科方向的协同创新能力。

根据重大研究计划的实施经验总结,提出下一步发展建议:

(1) 核能研究具有高门槛、高投入、高风险和高效益等特点,所需经费投入大。近年来在国家大力发展核能的战略驱动下本领域的研究队伍正迅速扩大,希望先进核能领域继续得到优先发展与支持。

(2) 通过重大研究计划的实施,推动了物理、材料、化学学科的交叉,出现了很好的学科交叉的态势和前景,但交叉与融合还需进一步深化。

(3) 核能研究特别重视基础、应用和工程之间的协同发展,在基础研究成果为国家重大工程项目服务方面还需要进一步加强。核能研究周期较长,一般每一代核电升级需要二十到三十年,建议在重大项目上延续对先进核裂变能方向的资助,继续培育学科力量,更好地发挥核能在交叉学科中的支撑作用以及为国家重大需求服务。

致谢 本文依据“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划的总结报告、成果报告和战略报告整理而成,特在此向所有对该计划做出贡献的指导专家组、管理工作组、秘书组和全体参研人员表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Yin XM, Wang YX, Bai XJ, et al. Rare earth separations by selective borate crystallization. *Nature Communications*, 2017, 8: 14438.
- [2] Liu JB, Chen X, Qiu YH, et al. Theoretical studies of structure and dynamics of molten salts: the LiF-ThF₄ system. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2014, 118(48): 13954—13962.
- [3] Wang Q, Wang XK, Chai ZF, et al. Low-temperature plasma synthesis of carbon nanotubes and graphene based materials and their fuel cell applications. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42: 8821—8834.
- [4] Zou YD, Wang XX, Ayub K, et al. Environmental remediation and application of nanoscale zero-valent iron and its composites for the removal of heavy metal ions: A review. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(14): 7290—7304.
- [5] Zhang S, Nie YB, Ren J, et al. Benchmarking of JEFF-3.2, FENDL-3.0 and TENDL-2014 evaluated data for tungsten with 14.8 MeV neutrons. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28: 27.
- [6] Luo F, Han R, Chen Z, et al. Benchmark test of JEFF-3.2, FENDL-3.0 and TENDL-2015 with TOF experiments for graphite, silicon carbide, uranium and multiple-slab samples. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 331: 342—347.
- [7] Tian G, Wada R, Chen Z, et al. Nuclear stopping and light charged particle emission in C-12+C-12 at 95 MeV/nucleon. *Physical Review c*, 2017, 95: 044613.
- [8] Lin W, Liu X, Wada R, et al. High-energy proton emission and Fermi motion in intermediate-energy heavy-ion collisions. *Physical Review c*, 2016, 94: 064609.
- [9] Zhang H, Ren F, Wang Y, et al. In situ TEM observation of helium bubble evolution in V/Ag multilayer during annealing. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 467: 537—543.
- [10] Li YF, Shen TL, Xing G, et al. Cavity swelling in three ferritic-martensitic steels irradiated by 196 MeV Kr Ions. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(12): 126101.
- [11] Wang XX, Yang SB, Shi WQ, et al. Different interaction mechanisms of Eu(III) and ²⁴³Am(III) with carbon nanotubes studied by batch, spectroscopy technique and theoretical calculation. *Environmental science & technology*, 2015, 49(19): 11721—11728.
- [12] Hu HS, Qiu YH, Xiong XG, et al. On the Maximum bond multiplicity of carbon: unusual C≡U quadruple bonding in molecular CUO. *Chemical Science*, 2012, 3(9): 2786—2796.
- [13] Xu C, Sun TX, Rao LF, et al. Interactions of bis(2,4,4-trimethylpentyl)dithiophosphinate with trivalent lanthanides in a homogeneous medium; thermodynamics and coordination modes. *Inorganic Chemistry*, 2017, 56: 2556—2565.
- [14] Zhang QN, Hu SX, Qu H, et al. Pentavalent lanthanide compounds; formation and characterization of praseodymium(V) oxides. *Angewandte Chemie. Int. Ed*, 2016, 55(24): 6896—6900.
- [15] Wang N, Li Y, Xie L, et al. Cerium separation with NaBiO₃ nanoflower material via an oxidation adsorption strategy. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8: 7907—7913.
- [16] Liu, YL, Ye GA, Yuan LY, et al. Electro-separation of thorium from ThO₂ and La₂O₃ by forming Th-Al alloys in LiCl-KCl eutectic. *Electrochimica Acta*, 2015, 158: 277—286.
- [17] Liu, YL, Yuan LY, Zheng LR, et al. Confirmation and elimination of cyclic electrolysis of uranium ions in molten salt. *Electrochemistry Communications*, 2019, 103: 55—60.

- [18] Wang C, Zhang D, Qiu S, et al. Study on the characteristics of the sodium heat pipe in passive residual heat removal system of molten salt reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 265: 691—700.
- [19] Huang K, Wu H, Cao L, et al. Improvements to the Transmutation Trajectory Analysis of depletion evaluation. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 87: 637—647.
- [20] He MT, Wu HC, Zheng Y, et al. Beam transient analyses of accelerator driven subcritical reactors based on neutron transport method. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, 295: 489—499.
- [21] Wang YL, Liu ZY, Li YX, et al. Umbellate distortions of the uranyl coordination environment result in a stable and porous polycatenated framework that can effectively remove cesium from aqueous solutions. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137: 6144—6147.
- [22] Chen LH, Zheng T, Bao SS, et al. A Mixed-valent uranium phosphonate framework containing U(IV), U(V), and U(VI). *Chemistry: a European journal*, 2016, 22(34): 11954—11957.
- [23] Wu YC, Cao L, Song G, et al. Development of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42: 68—72.
- [24] Wu YC. CLEAR-S: an Integrated non-nuclear test facility for China lead-based research reactor. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40: 1951—1956.
- [25] Wu YC. Design and R&D Progress of China lead-based reactor for ADS research facility. *Engineering*, 2016, 2: 124—131.
- [26] Wu YC, Bai YQ, Song Y, et al. Development strategy and conceptual design China lead-based research reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 87: 511—516.
- [27] Xue JX, Zhang GJ, Xu FF, et al. Lattice expansion and microstructure evaluation of Ar ion-irradiated titanium nitride. *Nuclear Inst. & Methods in Physics Research B*, 2013, 308: 62—67.
- [28] Li M, Zhou XB, Yang H, et al. The critical issues of SiC materials for future nuclear systems. *Scripta Materialia*, 2018, 143: 149—153.
- [29] Lu YH, Wang ZB, Song YY, et al. Effects of pre-formed nanostructured surface layer on oxidation behavior of 9Cr2WVTa steel in air and liquid Pb-Bi eutectic alloy. *Corrosion Science*, 2016, 102: 301—309.
- [30] Yuan LY, Liu YL, Shi WQ, et al. High performance of phosphonate-functionalized mesoporous silica for U(VI) adsorption from aqueous solution. *Dalton Transactions*, 2011, 40: 7446—7453.
- [31] Yuan LY, Liu YL, Shi WQ, et al. A Novel mesoporous material for uranium extraction, dihydroimidazole functionalized SBA-15. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22: 17019—17026.
- [32] Liu SH, Wang ZJ, Jia H, et al. Physics design of the CIADS 25 MeV demo facility. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2017, 843: 11—17.

Review of Major Research Plan on “Fuel breeding and Transmutation” in Advanced Nuclear Fission Energy

Li Huihong^{1*} Shi Weiqun² Zhan Wenlong³ Chai Zhifang² Dong Guoxuan¹

1. Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864

Abstract In this paper, the background, scientific goals, overall layout, implementation and academic management considerations, as well as the overall outcome of the Major Research Plan “Fuel breeding and transmutation in Advanced Nuclear Fission Energy” are summarized. The perspectives and suggestions for future development in the relative fields are provided.

Keywords Major Research Plan; nuclear fission energy; accelerator; reactor; nuclear safety; nuclear material

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: lih@nsfc.gov.cn