



编者按

前不久,中国科学院两大科学装置项目总部工程在广东省惠州市开工。按计划,强流重离子加速器(HIAF)和加速器驱动嬗变研究装置(CIADS)这两台“国之重器”,将在2021年中建成。建成后,有望成为世界最先进的核物理研究装置,并带动形成国际领先的核物理研究中心。

其中,CIADS作为我国加速器驱动先进核能系统的燃烧器部分,将深入探索核废料嬗变过程中的科学问题,突破系列核心技术、检验系统稳定性和可靠性,为未来工业示范装置奠定基础。

这一先进装置的研发,离不开科学家对基础科学问题的长期探索。

2010年,自然科学基金委设立了重大研究计划“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”,旨在以该领域关键基础科学问题为核心,在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、乏燃料后处理的新方法与新机理等方面取得创新性成果,最终解决战略性和前瞻性重大科学问题。

该重大研究计划历经8年,取得了丰硕成果。本期基金版将总结该重大研究计划取得的经验,展示取得的成绩。



詹文龙(右一)在惠州CIADS装置现场指导工作。

从1%到95%，“吃干榨净”核废料！

■本报见习记者 程唯加

近日,日本政府公布第5次修改过的福岛第一核电站报废计划路线图,将从2021年开始取出核燃料残渣,并力争在2031年将所有燃料棒取出。

如何解决核燃料的利用效率和乏燃料的安全处理处置问题,是国际核能界面临的共同挑战。

自2010年起,在国家自然科学基金重大研究计划“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”及之后的中科院战略性先导科技专项A类支持下,历经8年,中国科学家将核燃料利用率从“不到1%”提高到“超过95%”,有望使核裂变能从目前的百年变为近万年可持续、安全、清洁的战略能源。

“烫手”的乏燃料

核燃料是核电站的“粮食”,持续不断地在反应堆内燃烧,以供应核能运行。然而,燃烧后卸出的大量乏燃料,却成了“烫手山芋”。

“就像烧煤球,有些外面烧透了里面还是没有烧掉。”该重大研究计划指导专家组组长、中国科学院院士詹文龙告诉《中国科学报》,实际上,核反应

堆真正燃烧的东西很少。一般核能的功率密度是化学能的百万倍,现有核燃料能够燃烧的不到1%,剩余99%多为乏燃料,具有很大的放射性,危害时间长达10万年之久。

“和国际上大多数核电站一样,我国核电站的乏燃料多暂存在核岛内的水池中。”詹文龙介绍,一般核电站的水池设计容量仅能满足其15~20年的乏燃料总量。

而与之形成对比的是,全世界核电每年卸出的乏燃料大约10500吨,截至2008年累计总量已超过270000吨。

如何处理这些“烫手山芋”?目前国际上通常有两种方法。

一种是“一次通过”方式,即将乏燃料作为“废物”。经过暂时储存和适当包装后,直接进入最终地质处置,将废物埋藏在500~1000米深的地质层中,使之与周围的生物圈隔离。

另一种是“闭合燃料循环”方式,即将乏燃料视为“资源”。经过后处理分离出铀和钚等有用的核材料,回到热中子堆或快中子反应堆循环使用。后处理产生的高放废液经过玻璃固化之后,再进行最终地质处置。

乏燃料中仍有95%的铀没有燃

烧,同时还会产生一些新核素,如1%的钚和4%的其他核素。

“法国的燃料闭环方案是回收铀、钚等易裂变材料,以及可以利用的次锕系元素等物质,并制成核燃料组件再次使用,而其他放射性核素固化制成玻璃块状的高放废物封存。”詹文龙补充道。

其中,核燃料的增殖是铀钚资源利用最优化的核心,而乏燃料的分离嬗变则关系到核废物的最少化。

2010年,国家自然科学基金委员会发布重大研究计划“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”申请指南,詹文龙带领的团队获批。

次年,福岛第一核电站发生严重泄漏事故,再度为全球安全蒙上阴影,研发团队愈发觉得肩上的责任重大。

“日本多使用的是法国的闭合燃料循环方式,投入很大,只进行分离无法有效解决乏燃料问题。我们觉得应该尽快开发出新的完全循环利用方式,促进全球核能可持续发展。”他说。

从1%到95%

想要实现核燃料的增殖与嬗变,需

要依靠加速器驱动次临界系统(ADS)。

这套系统是加速器、散裂靶和反应堆的“结合体”。“简单地说,我们筛选出乏燃料中毒性最高的一部分,用加速器把它给打碎,这样其寿命可大大缩短,放射性毒性可以消减。”詹文龙说。

2012年,该核能系统中关于优化资源和废物的新思路在詹文龙脑海中形成了雏形。他的想法是,首先简化乏燃料再生,先排除大于50%裂变产物再转化为再生乏燃料。然后利用可控高反应性快中子燃烧器,燃烧含大于50%裂变产物的再生乏燃料。

在降低毒性方面,则只需对50%的裂变产物提纯,剩余50%保持不动。这样减少了分离的难度,也没有核扩散的危险。

此外,团队还原创性提出颗粒流散裂靶的概念并建成原理样机。其原理和沙漏类似,高密度散裂靶热可导出异地实时处理,有效减少引起的放射性污染。

不过,传统的ADS只是把长寿命高放核废料进行嬗变处理为短寿命或低放核废料后再进行地质永久处置。从商业上来说只有投入没有产出,是

“赔钱”的系统,因此,团队后又原创性地提出了加速器驱动先进核能系统(ADANES)这一全新概念。

ADANES是集核废料的嬗变、核燃料的增殖以及核能发电于一体,具有固有防核扩散特性的先进核燃料闭式循环技术。可将铀资源利用率由目前的不到1%提高到超过95%,处理后核废料量不到乏燃料的4%,放射寿命由数10万年缩短到约500年。

“不光做嬗变,把毒物减少,同时提高核资源的利用率,使燃料增殖,过程中还能正常发电,同时也提高了经济竞争力。”詹文龙表示,目前他们已完成了一系列实验室模拟原理验证实验并取得了突破性进展和应用。

AB方案同台“竞技”

据了解,该重大研究计划聚集了国内相关领域的各研究单位。自实施以来,为确保ADS/ADANES的顺利实施,项目实行了A/B角/A/B方案,同台“既合作又竞技”。

詹文龙回忆,样机制作过程中技术变化很大,尤其在强流超导直线加速器研发方面,很多小组都提出了不

同的技术路线。“往往上半年提出的方案,下半年就有可能被推翻。”

于是,项目组让中科院近代物理研究所和中科院高能物理研究所作为A/B角依照各自方案实施制作。经过对比研讨、攻关,我国最终引领了这一重大核心技术。

目前,项目中的加速器技术在国家重大科技基础设施中已有应用,并受到部分企业的青睐,还可衍生至药物的靶向同位素治疗。

值得一提的是,该重大研究计划大大促进了基础放射化学的学科发展。

不过,核能研究具有高门槛、高投入、高风险和高效益等特点,所需经费往往是其他一些学科的数字或几十倍。同时,核能研究周期较长,一般每一代核电升级需要20~30年。

詹文龙指出,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技术服务方面还需要进一步加强。

“希望相关部门能够继续对先进核裂变方向的资助,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。”他说。

ADS 驱动器从“跟跑”到“领跑”



何源团队

核废料处理问题是核能发展需要解决的关键问题之一,加速器驱动次临界系统(ADS)是解决核废料问题的一种非常有效的方法。国际上没有高功率ADS原理验证装置,高功率连续波流质子加速器及相应的散裂靶是ADS的驱动器。

连续波流质子加速器是解决重大科学问题、国家重大需求以及国民经济重要问题的关键工具,也是未来先进加速器研究的前沿方向之一。超重元素合成、放射性束束工厂、高通量加速器、中微子工厂、加速器驱动的核燃料嬗变、先进核裂变能、裂变聚变材料辐照、放射性同位素生产等领域,对从几十千瓦到几十兆瓦的高功率质子束提出了迫切需求。而可靠的高功率密度散裂靶也是这些装置的“咽喉”技术,其运行功率密度、运行寿命、对加速器束流的要求,决定了整个装置的性能。

目前国际上还没有运行的连续波流强流质子束,低能强流束的稳定可靠传输与加速,以及可稳定承受十兆瓦功率的散裂靶仍是世界性难题。

在国家自然科学基金“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划的支持下,来自中科院近代物理研究所、中科院高能物理研究所、清华大学、北京大学和中科院上海应用物理研究所的课题组,在ADS驱动器研究中取得代表性成果,连续波流超导直线加速器高功率调试实现国际领

先;原创提出并原理验证全新高功率散裂靶技术路线。

2017年,由中科院先导专项支持研制的国际首台ADS超导直线加速器25MeV前端示范样机(CAFe)建成。中科院近代物理研究所何源牵头的项目组基于CAFe加速器研究平台,逐步实现了2毫安连续波流低能离子束的稳定传输与加速。该成果是国际ADS加速器的一个里程碑,验证了RFQ和HWR超导腔稳定加速10mA连续波质子束的可行性,并在稳定运行高功率连续束流方面积累了大量第一手的经验,创造了目前国际上连续波流超导直线加速器所达到的最高束流功率和最长运行时间纪录。另外,项目组提出并验证了基于等离子体、氢清洗等多措施复合的HWR超导腔在线恢复技术,首次在测试平台实现低beta超导腔性能下降的恢复。该方法可将超导腔性能恢复时间从6个月缩短到20天以内。

中科院近代物理研究所王志光牵头的项目组在新科学平台及散裂靶研究方面取得代表性成果。该项目组提出原创概念颗粒流散裂靶,开发出自主知识产权的基于颗粒流靶的ADS设计模拟程序,并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。上述研究成果和数据被用于CIADS装置物理方案优化设计、创新性ADS系统—加速器驱动陶瓷快堆(ADCFR)的概念设计。

“核废物”处理实现镧钪分离

核能大规模可持续发展是我国的战略需求,“分离—嬗变”先进燃料循环,能从根本上消除放射性的长期危害。镧钪分离(尤其是三价镧分离)及三价镧系组内分离对于先进燃料循环的建立具有重要的意义。

在国家自然科学基金重大研究计划“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”的支持下,清华大学陈靖课题组与中科院高能物理研究所、中国工程物理研究院、中国科学院原子能科学研究所、四川大学等多家单位通力合作,在镧钪分离及三价镧系组内分离方面取得了重要突破。

陈靖表示,在湿法分离方面,研究团队主要针对乏燃料后处理中三价镧分离及三价镧系组内分离等挑战性问题,基于特定配体及先进功能材料的特异选择性,进一步开发了溶剂萃取或吸附分离技术,实现了对目标元素的高效富集分离。

该研究成果一方面发展了我国具有自主知识产权的Cyanex 301分离三价镧流程,为该流程的未来应用奠定了基础。另一方面,其建立高效的Am/Cm分离方法,可进一步减少α放射性废物的体积并提高镧系元素的嬗变率,

使分离出的镧系元素满足其嬗变的要求,服务于先进核裂变能的燃料增殖与嬗变的总体目标。

在干法分离方面,课题组在LiCl-KCl熔盐体系中成功以形成铝合金的形式实现了镧系与镧系元素的有效分离。

研究人员表示,在传统干法后处理过程中,电精炼环节产生的废盐中含有镧系元素和镧系元素,而且经过累积镧系元素的含量较高,这种情况下镧系元素与镧系元素的分离困难,传统的镧钪分离效果很难满足实际需求。如果将电精炼产生的废盐直接存储在环境中,则会对环境造成危害。

研究团队发现,铝阴极非常适合在电精炼废盐中分离镧系元素与镧系元素。采用铝阴极将废盐中的镧系元素以合金的形式提取,同时实现与镧系元素的分离,然后再将镧系元素从熔盐中除去,可以纯化熔盐,极大地减小废物体积。

这一方法为我国干法后处理技术的发展奠定了科学基础,为熔盐电精炼流程中如何实现废物的最小化提供了重要的技术支持。

陈靖期待,上述研究成果在大力推动我国核化学与放射化学学科发展的同时,也能进一步将相关技术推向工业化应用。



陈靖团队

“核燃料包壳管”有了新材料

ADS加速器被世界科学界公认为解决大量放射性废物、降低深埋储藏风险的最具潜力的工具,其所用加速器流强要求很高,尤其对加速器的稳定性要求极高。但是,目前面向核燃料包壳管应用的研究仍然比较薄弱,材料强度降低、热导率下降、密封性差、服役寿命短等是这一领域中最关键的科学问题。

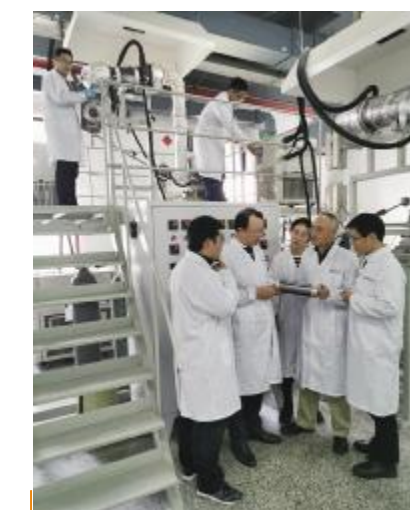
围绕这一难题,在国家自然科学基金重大研究计划“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”的支持下,中科院黄庆课题组带领的研究团队,针对核连续碳化硅纤维、中间层涂层、复合材料制备与加工技术、辐照损伤与性能预测开展了系统研究,并取得了一系列代表性的成果。

黄庆介绍,研究团队通过分子调控获得低氧含量碳化硅纤维,首次提出含有Al-C化学键结构的高铝(高于1wt%)碳化硅纤维有望形成自主知识产权的核用特种纤维材料。同时,突破了液态超支化聚碳硅烷(LHBPCS)制备技术,其陶瓷化产物接近SiC化学计量比,氧含量低(0.1%)。

另一方面,传统中间层界面在核能结构材料应用中遇到很大的挑战,其最关键的科学问题是纤维与基体之间的界面层在辐照下体积膨胀失配,从而产生裂纹导致复合材料容错性失效,这是碳化硅纤维增强碳化硅复合材料辐照后强度降低、热导率下降、腐蚀加速和裂变气体溢出的根本原因。

为解决这一问题,研究团队在前期中北京大学薛建明和王宇钢等研究小组系统研发了三元层状MAX相辐照损伤机制和缺陷结构的演变行为,首次提出并实现三元层状MAX相材料作为SiC/SiC中间层,重离子辐照研究表明该新型中间层具有很好的抗肿胀特性。

ADS核燃料陶瓷包壳管工程应用重大挑战之一是碳化硅复合材料端封问题,研究团队利用Ti-Si-C三



科研人员在工作中。

元相图控制连接层相梯度分布,获得高强度、低界面应力、耐辐照和耐腐蚀的可靠连接,实现了TiC/Ti₃SiC₂全碳化物梯度连接层连接SiC,有效解决了界面热应力问题,所得连接结构的四点弯曲强度高达325MPa。此外,该团队在国际上首次提出碳化硅陶瓷无缝连接解决方案,并研发出系列“可牺牲”型陶瓷焊料实现碳化硅陶瓷及复合材料一体化封装。

随着研究的不断推进及其与有机化学、无机化学、高温熔盐化学、真空镀膜、材料计算等多学科的交叉融合,研究团队不断取得系列突破。该研究方向也入选了中国科协2018年度“重大科学问题与工程技术难题”,并获批国家发改委“十三五”科教基础设施平台项目“新能源技术与材料综合研发平台——碳化硅纤维及复合材料研发及应用平台”。

在研究人员看来,上述系列研究成果有望推动核燃料包壳管的选型和实际应用。

本版稿件除署名外均由本报记者甘晓、实习生丁苏雅撰写