

未来先进核裂变能——ADS嬗变系统

1 立项背景和意义

核裂变能是一种安全、低温室气体排放且经济性好的能源。然而，核裂变能的可持续发展面临着诸多挑战，尤其是在日本福岛事故之后，公众对发展核能存有恐惧心理，这就对未来先进核能系统的安全性提出了更为严苛的要求。在确保安全（safety and security）的前提下，核裂变能的长期可持续发展必须经济可行地解决核燃料的稳定供应和核废料的安全处理两大问题。后一个问题是我国乃至国际核能界无法回避的重大问题，也是尚未解决的世界性难题。

加速器驱动次临界系统（Accelerator Driven Sub-critical System, ADS）具有强大的嬗变能力、良好的中子经济性、优良的系统安全性，不仅在嬗变核废料方面有难以替代的优势，还具备增殖核燃料和利用钍作为燃料发电的潜力，被国际公认为最有前景的利用嬗变安全处置长寿命核废料的技术途径（图1）。

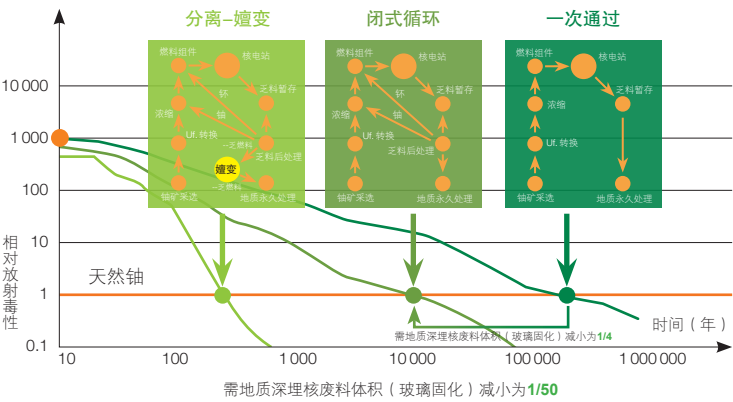


图1 核燃料循环模式过程效果图

ADS系统由加速器、散裂靶和反应堆三大分系统组成。其工作原理是，利用加速器产生的高能强流质子束轰击重核产生宽能谱、高通量中子作为外源来驱动次临界堆芯中裂变材料发生持续的链式反应，使得长寿命放射性核素最终变为非放射性的或短寿命的核素，并维持反应堆运行（图2）。

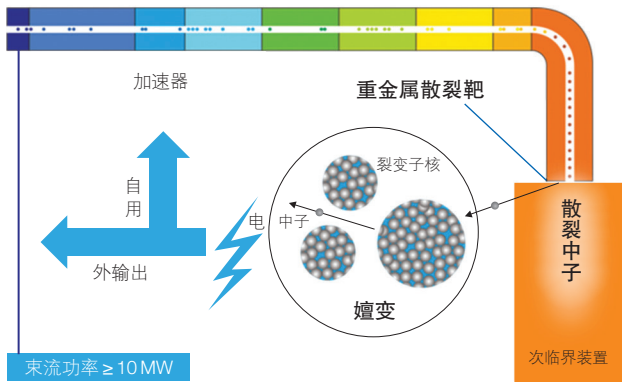


图2 ADS原理示意图

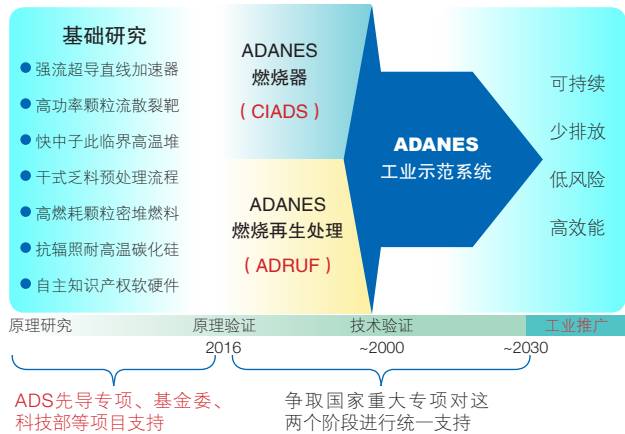
目前，国际上尚未建成ADS装置。欧盟各国、美、日、俄等核能科技发达国家均制定了ADS中长期发展路线图，正处在从关键技术攻关逐步转入建设集成系统的ADS原理研究装置阶段（表1）。我国从20世纪90年代起开展ADS概念研究，在科技部、基金委及中科院等项目支持下开展了前期研究工作。

2011年1月，中科院适时启动战略性先导科技专项“未来先进核裂变能——ADS嬗变系统”（以下简称“ADS专项”），并在专项实施过程中逐步形成了我国加速器驱动先进核能系统（Accelerator Driven Advanced

表 1 国际ADS设计参数一览表（部分）

项目		加速器功率（MW）	K _{eff}	堆功率（MW）	中子通量（n/cm ² /s）	靶	燃料
欧盟	MYRRHA	2.4（600MeV/4mA）	0.955	85	10 ¹⁵	铅铋	MOX
	AGATE	6（600MeV/10mA）	0.95—0.97	100	快, ~10 ¹⁵	钨	MOX
	EFIT	16（800MeV/20mA）	~0.97	数百	快, ~10 ¹⁵	铅（无窗）	MA
俄罗斯	INR	0.15（500MeV/10mA）	0.95—0.97	5	快	钨	MA/MOX
	NWB	3（380MeV/10mA）	0.95—0.98	100	快, 10 ^{14—15}	铅铋	UO ₂ /UN U/MA/Zr
	CSMSR	10（1GeV/10mA）	0.95	800 cascade scheme	中间 5×10 ¹⁵	铅铋	Np/Pu/MA 熔盐
日本	JAERI-ADS	27（1.5GeV/18mA）	0.97	800	快	铅铋	MA/Pu/ZrN
韩国	HYPER	15（1GeV/10—16mA）	0.98	1000	快	铅铋	MA/Pu

Nuclear Energy System, ADANES）发展路线图（图3），分4个阶段实施：（1）原理研究及关键技术攻关阶段。由ADS专项支持，初步证明ADANES物理原理的可行性，并在设计中进行优化，同时申报“十二五”国家重大科技基础设施“加速器驱动嬗变研究装置”（China Initiative Accelerator Driven System, CIADS）；（2）“ADANES重大项目”系统集成及规模验证阶段。完成ADANES燃烧器系统验证装置CIADS建设，开展ADANES燃料循环再生循环系统（Accelerator Driven Recycle of Used-Fuel, ADRUF）原理验证，期间争取国家重大项目立项；（3）“ADANES重大项目”示范工程阶段建设阶段。在国家重大项目支持下，建成百兆瓦级ADANES工程示范项目；（4）ADANES系统工业应用阶段。由企业主导进行ADANES系统商业化应用推广。



2 取得的进展

本专项作为 ADANES 发展路线图中的第一阶段，其目标旨在着力解决 ADS 加速器、散裂靶、反应堆系统中的各单项关键技术问题。同时，根据示范装置的需求开展前瞻性研究工作，发展 ADS 研究所需的平台基础。再利用 CIADS 建设项目的支持，从整机集成的层面上掌握 ADS 各项重大关键技术及系统集成与 ADS 调试经验，为下一步建设 ADANES 示范装置奠定基础。

专项启动至今，已在超导质子直线加速器、重金属散裂靶、次临界反应堆及核能材料等研究方面取得了重要进展和突破，一些关键技术达到国际领先或先进水平。总体来说，我国 ADS 研究已经从基础研究阶段向工程实施阶段开始过渡。

2.1 超导质子直线加速器

实现了离子源、RFQ（射频四极）加速器、低β超导腔、高功率耦合器、功率源、超导磁体、低温恒温器等超导直线加速器所需单项技术突破，并已进行系统集成研究。

在单项技术突破方面。研制成功高稳定度的强流质子源；162.5MHz@2.1MeV ADS RFQ 加速器通过了中科院重大科技任务局组织的专家现场技术测试，这是继美国洛斯阿拉莫斯（LANL）国家实验室 LEDA RFQ 后，国际上第二个达到或超过 10mA 的连续波质子束 RFQ 加

速器,也是目前国际上稳定运行的连续波离子束 RFQ 加速器中束流强度最高的;325MHz@3.2MeV ADS RFQ 加速器束流平均功率位于世界最高;Spoke012 超导腔是目前国际上 β 值最低的 Spoke 腔,目前已实现 Spoke012 双腔系统集成和 2K 低温下带束流运行;Spoke012、Spoke021、HWR010 超导腔垂直测试性能指标达到了国际先进水平。

在系统集成方面。“在系统集成方面。注入器 I 获得了能量 10 MeV、流强为 2.1 mA 的连续波 (CW) 质子束。注入器 II 先后获得能量 10.06 MeV、流强 11.8 mA 的脉冲束与能量约 10 MeV、流强 1.1—2.7 mA 的连续束。两台注入器达到的性能指标,均达到了 ADS 先导专项的指标要求,并超过了国际上目前唯一处于调试运行中的以色列连续波强流超导直线加速器装置 (SARAF),居国际领先水平。后续,ADS 加速器团队将继续向下一阶段 20—25 MeV 的能量目标奋勇挺进。

2.2 重金属散裂靶

基于颗粒流靶的各项技术验证及台架实验现已全面启动,样机各分系统和回路均已就绪,即将进入联调实验阶段。

2.3 次临界反应堆

完成了具有临界和加速器驱动次临界双模式运行能力的创新型 10MW ADS 铅铋冷却研究实验堆的详细方案设计并通过国际同行专家系列技术评审和设计评估;建成了多功能铅铋堆技术综合实验回路 KYLIN-II,集材料服役、热工水力及安全实验于一体,可为铅铋堆材料服役性能、热工水力、非能动余热排除技术和堆事故安全特性等方面提供基础研究和工程验证平台;完成了铅铋环境下换料机构和控制棒驱动机构等 CIADS 装置用铅铋冷却反应堆关键部件样机研制及铅基堆工程技术集成试验装置 CLEAR-S 工程设计;完成零功率装置的安装、调试和临界准备。

2.4 平台及配套设施

建成了超导腔焊接加工工艺实验室、超导腔处理

与测试平台、低温站、乙级放化实验及放化材料计算平台、核材料辐照/辐射/高温协同作用综合实验平台、散裂靶设计模拟软硬件平台、核数据测量平台、液态铅铋散裂靶关键技术研究平台等,保证了先导专项各项研究工作的顺利推进。

2.5 总体方案及选址

确定了 CIADS 总体设计方案并形成了项目建议书,并于 2015 年底获得国家发展改革委立项批复;确定了场址,完成了新园区场址初步可行性分析报告及场址普选阶段的环境影响报告。

2.6 前瞻性探索研究

在材料研究方面,目前已完成 5 吨级 SIMP 钢制备;同时,开展了 SiC 复合纤维材料研发,建成第三代 SiC 复合纤维中试生产线。在核燃料制备方面,完成了铀纳米材料的制备和系列铀系有机化合物晶体的合成,制备出不同粒径的铀球和钚球,开展了 50% 部分裂变产物排除法和包含次铀系新燃料元件制备探索研究,原理基本可行;在反应堆先进二回路设计方面,获得了主换热器、回热器优化设计方案并加工完成实验样机,建成了 LBE-He 换热综合实验平台。

在中科院先导专项中期检查中,ADS 系统和关键技术研究获专家高度认可。在国际评估中被专家评为国际领先 (International leadership),并被 IAEA 列入到相关工作组合作计划中。在中科院所属研究所“十二五”验收中,近物所“一三五”中突破 ADS 关键技术被评为院“百优”。近物所 ADS 研究团队荣获 2015 年“中国科学院先进集体”荣誉称号。2015 年度 A 类先导专项绩效评估综合排名第一。

3 独创性

我国 ADS 研发经历了从无到有,从跟踪研究到原始创新的艰难发展历程。随着 ADS 专项的实施,众多独创性的理论、方法和技术被不断提出,并在试验和认识循环往复的过程中不断优化,如:

(1) 提出 ADANES 全新概念和方案, 并基本完成了原理的模拟试验验证。它是集核废料的嬗变、核燃料的增值, 以及核能发电于一体的先进核燃料闭式循环技术。目前, ADANES 已由中科院向国家提交专报并获得批示, 国内外反映积极, 科技部、发改委、国防科工局联合评议结果建议“支持发展 ADANES, 分阶段逐步实施”, 并已同中广核、广东省、福建省政府签订战略合作协议。

(2) 创造性地提出了新型流态固体颗粒靶概念并完成初步设计, 与电子束耦合的小型台架原理性实验获得成功。该方案受到同领域专家积极评价和关注, 欧洲核子中心 CERN 已联合多家欧洲实验室开展束流实验, 比利时的 MYRRHA 团队也已安排人员和经费开展相关设计。

(3) 在材料研究方面, 自主配方、自主研制的 SIMP 钢, 其已测试的性能指标均优于或不亚于目前国际主流核能装置用抗辐照结构材料, 有望成为一种新的核能装置候选结构材料。

4 对产业的意义

ADS 专项以实现我国核废料安全处理为切入点开展 ADS 原理及关键技术研究, 并利用 CIADS 及 ADRUF 建设项目的支持, 为最终建造我国 ADANES 工业示范装置及商业化推广奠定技术基础, 这将对保障我国核裂变能长期可持续发展产生显著的影响; 同时, 专项高度重视关键技术与产业应用的紧密结合, 如自主设计研发的 SIMP 钢, 必将在我国核工业工程中得到广泛应用;

此外, ADS 专项的研发促进了我国在机械加工、软件开发、加速器(涉及磁铁、低温、真空、电源、功率源、准直、超导)、辐射防护、放射化学等先进技术领域的发展, 提升了我国的国际形象 and 地位。

5 对我国学科、产业推进、人才培养等未来部署的建议

(1) ADANES 的研发涉及学科众多, 需要相关研究院校、政府、企业等共同攻关。其研发是一个比较长期的过程, 必须经历原理研究及关键技术攻关、系统集成及规模验证、工程示范等几个过程, 最终才能达到商业化推广。因此 ADANES 研发必须纳入国家的中长期规划, 并在国家层面上明确 ADANES 在核能可持续发展战略中的地位和作用。

(2) 在 ADS 专项、“973”计划等项目支持下, 国内已经形成了一支稳定的 ADANES 研发力量, 并开始由原理研究及关键技术攻关向系统集成及规模验证转变。应继续从多种渠道(如国家重大项目)延续其发展。

(3) 设立专门计划、匹配专项资金, 建立科学的用人机制和形式多样的人才聘用制度, 积极吸引国内外优秀的研究人员和工程技术人员参与 ADANES 研究工作; 通过工程项目支持国内青年科学家与工程技术人员承担重要任务、参与国际交流合作、开展跨学科研究等多种形式, 锻炼、培养和造就一批青年科学研究和工程技术人员。

(依托单位: 中科院近代物理所、中科院高能物理所、中科院合肥物质科学院)

专家点评

以国家核能可持续发展战略需求为牵引，为实现核废料安全处理处置，中科院于2011年适时启动ADS先导专项。作为我国加速器驱动先进核能系统（ADANES）前期预研项目，专项针对ADANES燃烧器的关键核心技术已取得一系列重大突破，部分关键技术达到国际先进或领先水平，引起国内外同行广泛关注。并在专项实施过程中，逐步形成一支年龄结构合理、专业齐全的技术研发团队。同时，作为ADS先导专项工作的后续衔接，其集成验证装置“十二五”国家重大科技基础设施——加速器驱动嬗变研究装置（CIADS）已获发改委立项批复，即将启动实施。ADANES乏燃料循环再生处理系统实验设施已同福建省、中广核签订合作协议。总体来说，我国ADS研究已经从基础研究阶段向工程实施阶段开始过渡，同国际ADS主流研发国家保持同等发展步伐。相信未来ADANES发展，必将对保障我国核裂变能长期可持续发展产生显著影响。

点评专家

魏宝文 核物理学家，中科院院士，研究员，博士生导师，1957年毕业于北京大学物理系，历任中科院近代物理所所长、兰州分院院长、兰州重离子加速器国家实

验室主任等职。主要从事核物理和加速器物理研究，曾获国家科技进步奖一等奖，中科院科技进步奖一、二等奖等。

专家点评

ADS具有强大的嬗变能力、良好的中子经济性、优良的系统安全性，不仅在嬗变核废料方面有难以替代的优势，还具备增殖核燃料和利用钍作为燃料发电的潜力，被国际公认为最有前景的利用嬗变安全处置长寿命核废料的技术途径。ADS先导专项启动实施以来，已在超导质子直线加速器、重金属散裂靶、次临界反应堆及核能材料等研究方面取得了重要进展和突破，一些关键技术达到国际领先或先进水平。创新性提出的ADANES方案，有望成为一种超越国际第四代反应堆技术的先进核能系统构想。

点评专家

Waclaw Gudowski 瑞典皇家工程科学院院士、欧盟地中海艺术与科学学院院士、教授，现就职于瑞典皇家理工大学。主要从事中子学和反应堆物理，核废料嬗

变，加速器驱动嬗变系统，先进反应堆，第四代反应堆，核废料处置等研究。