

未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统^{*}

詹文龙¹ 徐瑚珊²

(1 中国科学院 北京 100864 2 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 加速器驱动次临界系统(ADS, Accelerator Driven Sub-critical System),以加速器产生的高能强流质子束轰击靶核(如铅等)产生散裂中子作为外源中子驱动和维持次临界堆运行,具有固有安全性。ADS 系统的中子能谱硬、通量大、能量分布宽,嬗变长寿命核素能力强,既可大幅降低核废料的放射性危害,实现核废料的最少化处置,同时还有能量输出,可以提高核资源的利用率,被国际公认为核废料处理的最有效手段。中科院于 2011 年启动了“未来先进核裂变能”战略性先导科技专项,其中 ADS 嬗变系统作为其两大部署内容之一,将致力于自主发展 ADS 系统从试验装置到示范装置的全部核心技术和系统集成技术,为保障国家能源供给和核裂变能长期可持续发展做出贡献。

关键词 核能,乏燃料,ADS,可持续发展

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.017



中国科学院副院长詹文龙院士

1 核能是保障我国经济社会发展的重要能源

1.1 核能是技术成熟的清洁能源

环境、能源与资源是人类生存和长期可持续发展的基础。煤炭、石油、天然气等传统的化石能源支撑了

19 世纪以来人类文明的快速进步和经济社会发展。然而,据世界能源会议统计,探明可采石油、天然气和煤炭储量分别为 1 211 亿吨、119 万亿立方

米和 15 980 亿吨,预计还可开采 30—40 年、60 年和 200 年。我国一次能源生产总量及其构成中化石能源约占 92%^[1],单一的能源消费结构导致能源供应面临潜在危机。同时,化石能源消费带来大量温室气体等有害物质的排放。一座百万千瓦级的煤电厂每年要消耗约 300 万吨原煤,释放 SO₂ 2.6 万吨、NO_x 1.4 万吨、CO₂ 600 万吨、飘尘 0.35 万吨,对环境造成极大威胁和损害。因此,发展清洁能源成为全球能源发展的优先选择。

目前,水电和核能总体上已经具有大规模生产能源的成熟技术,同时在电价上具有竞争力,是发展清洁替代能源的两种较为现实的选择。

1.2 发展核能是我国能源可持续发展战略的重要内容

我国在 2005 年明确提出了积极发展核电的战略方针,2007 年国务院颁布了《核电中长期发展规

^{*} 收稿日期:2012 年 5 月 22 日



划(2005—2020年)》,计划到2020年核电运行装机容量争取达到4000万千瓦,2020年末在建核容量应保持在1800万千瓦左右。虽然2011年日本的福岛核电站核泄漏事故引发了全球对核电安全问题的反思,也使中国核电发展“减速”,但作为能源消费大国,发展核能在中国经济社会可持续发展中的重大战略地位没有改变。2011年12月,国家能源局正式发布了《国家能源科技“十二五”规划(2011—2015)》,将核能作为新能源领域的首要技术手段进行规划,提出了未来核能发展方向。2012年1月16日,国务院总理温家宝在世界未来能源峰会上表达了中国政府对核电的态度:安全高效地发展核电,是解决未来能源供应的战略选择。在2012年“两会”的政府工作报告中,首次将“安全高效发展核电”写入政府工作报告。作为中国经济发展能源的必然选择,核能发展必将迎来新的春天。

2 核能长期持续发展必须实现核废料的安全处置

2.1 核乏料的产生

自然界中,易裂变的铀-235(^{235}U)的天然丰度仅为0.72%,铀-238(^{238}U)为99.28%。轻水堆作为目前核能发电的主要堆型,主要采用 ^{235}U 含量为3.5%左右的铀为核燃料。当反应堆运行至 ^{235}U 浓度降到一定程度后,核燃料就需卸出,成为核乏料,以一座百万千瓦的反应堆估算,其中包括可循环利用的 ^{235}U 和 ^{238}U 约23.75吨、钚(Pu)约200公斤、中短寿命的裂变产物约1吨、次锕系核素(MA, Minor Actinides)约20公斤、长寿命裂变产物(LLFP, Long-Lived Fission Product)约30公斤。对乏燃料的潜在危害性分析表明,其远期风险主要来自MA和LLFP,需经过衰变几万甚至几十万年,其放射性水平才能降到天然铀矿的水平。

随着我国压水堆核电站装机容量的增长,核废料的累积量将快速增加。如果2030年核电装机容量达到8000—10000万千瓦,届时乏燃料累积存量将达到2万—2.5万吨,其中所含Pu 160—200吨,MA 16—20吨,LLFP 24—30吨。

2.2 核乏料的处理策略

国际上现有“开环”和“闭式”两种核燃料循环模式。在开环模式中,核乏料在经冷却和封装后即被深埋于地层深处,因此也被称为“一次通过”模式。这种模式相对费用较低,特别是未对其中的Pu进行分离,可防止核扩散;但由于需要在地质层中长期存放,其环境风险无法预期和有效控制,同时还不可避免地浪费核燃料和其他同位素等宝贵资源。闭式循环则是将核乏料通过后处理分离出其中的铀和钚并再次制成核燃料使用,对MA和LLFP则进行地质深埋处置。这种模式在提高核资源利用效率的同时,还可大幅减少高放射性核废料的处置量。目前,由于处置简单和低成本(不考虑对环境的长期影响),大多数的核裂变能应用采取“一次通过”政策,部分发达国家则一直坚持闭式循环研究,长期发展后处理技术、混合氧化铀钚(MOX)燃料技术等关键技术,目前发展到可商业应用的水平。

随着加速器技术的发展,上世纪90年代核物理学家又提出了更为先进核废料处理策略,即分离-嬗变(P-T, Partition-Transmutation)战略,其核心是在闭式循环的后处理分离基础上,进一步利用核嬗变反应将长寿命、高放射性核素转化为中短寿命、低放射性的核素。研究表明,长寿命高放射性核废料的放射性水平经过嬗变处理后,可在约700年内降低到普通铀矿的放射性水平,仍需地质深埋处理的核废料体积比闭式循环模式可再减小5倍以上。这种方案基本上可解决地质存储的核废料容器和地质条件存在的问题。目前,P-T战略在国际上也还处在研究阶段。3种燃料循环模式的原理过程如图1所示。

3 ADS是安全处置核废料的首选技术途径

ADS系统是上世纪核科学技术发展中两大工程——加速器和反应堆的“结合体”,能够将长寿命高放核废料嬗变成短寿命核废料,同时减小体积,被认为是最有效的核废料处置技术方案,目前世界上尚无建成先例。ADS的基本原理是,首先利用加速器产生的高能质子束轰击重金属靶引起散裂反



究。比利时核能研究中心(SCK·CEN)的 MYRRHA 计划,期望 2023 年左右建成由加速器驱动的铅铋合金(Pb-Bi)冷却的快中子次临界系统,其主要设计指标为反应堆 50—100MW_t、强流加速器 600MeV/3mA,铅铋合金作为靶和冷却剂,目前该计划仍在设法筹集和落实经费。

美国通过早先实施的加速器生产氙的 APT 计划,在强流质子加速器方面有较多的技术储备。1999 年制订了加速器嬗变核废料的 ATW 计划,从 2001 财年开始实施先进加速器技术应用的 AAA 计划,全面开展 ADS 相关的研究,作为美国先进核燃料循环系统 AFCI 的有机组成部分。当前洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)又提出了 SMART 计划,研究核废物的嬗变方案;费米实验室计划建造的多用途高能强流质子加速器 Project-X,除高能物理研究外,也打算将 ADS 的应用纳入其中。

日本 1988 年启动了最终处置核废料的 OMEGA 计划,认为 ADS 是嬗变 MA 的最佳选择,后期集中于 ADS 开发研究。2009 年由日本原子能

机构和高能加速器研究机构联合建造了日本强流质子加速器装置(J-PARC),进一步将直线加速器能量提高到 600MeV,可开展 ADS 实验研究,包括材料和 ADS 中子学研究等。

俄罗斯理论与实验物理研究所(ITEP)于上世纪 90 年代与美国 LANL 合作开展 ADS 开发工作。1998 年俄联邦原子能工业部决定启动 ADS 开发计划,工作内容涉及 ADS 相关核参数的实验、理论与计算机软件开发、ADS 实验模拟试验装置的优化设计、1 GeV/30 mA 质子直线加速器的发展、先进核燃料循环的理论与实验研究等。俄罗斯还比较重视 ADS 的新概念研究,典型的有快-热耦合固体燃料 ADS 次临界装置概念设计、快-热熔盐次临界装置概念设计等。

另外,韩国和印度等国也均有 ADS 的研究开发计划。国际上部分 ADS 装置的设计指标参数参见表 1。

20 余年的研究使国际上的 ADS 系统从概念研究进入物理过程、关键技术和部件研究及核能系统

表 1 国际 ADS 设计一览表(部分)

项目	加速器功率(MW)	K _{eff}	堆功率(MW)	谱通量(n/cm ² /s)	靶	燃料
日本 2004 JAERI-ADS	27 (1.5GeV/18mA)	0.97	800	快	铅铋	MA/Pu/ZrN
韩国 HYPER	15 (1GeV/10~16mA)	0.98	1 000	快	铅铋	MA/Pu
意/法 XT-ADS-A/B	3.6 (600MeV/3~6mA)	0.95~0.97	80	快 10 ¹⁵	铅铋/钢	U/Pu/MOX
比利时 XT-ADS-C	1.75 (350MeV/5mA)	0.95	50	快 3×10 ¹⁵	铅铋 (无窗)	U/Pu/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
俄罗斯 NWB	3 (380MeV/10mA)	0.95—0.98	100	快 10 ¹⁴⁻¹⁵	铅铋	UO ₂ /UN U/MA/Zr
俄罗斯 CSMSR	10 (1GeV/10mA)	0.95	800 cascade scheme	中间 5×10 ¹⁵	铅铋	Np/Pu/MA 熔盐

集成方案研究,下一步是建设小尺度系统集成装置,为建设工业示范装置奠定技术基础和积累运行经验,但目前欧美经济危机将影响到该研究进展。

我国从上世纪 90 年代起开展 ADS 概念研究,与核能科技先进国家相比,虽然起步较晚,但长期的核科学基础研究和核电发展使我国在加速器、反应堆等方面具有一定的技术积累,且很好地借鉴了国外的先进经验。在科研人员努力下,我国 ADS 研究有望通过 3—5 年的努力达到国际先进水平。

1999 年起开始实施“973”项目“加速器驱动的洁净核能系统(ADS)的物理和技术基础研究”,中国原子能研究院和中科院高能所共同建成了快-热耦合的 ADS 次临界实验平台、ADS 专用中子和质子微观数据评价库、加速器物理和技术、次临界反应堆物理和技术等方面的探索性研究取得一系列成果。此外,中科院还重点支持了超导加速器的技术和抗辐射材料的研发,结合院内相关所的优势部署了重大项目“ADS 前期研究”。

5 实施中科院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能”

中科院通过多次院士咨询^[2],对 ADS 发展前景进行了全面的分析评估,认为:从我国裂变核能可持续发展战略中的地位来看,快堆侧重核燃料增殖,ADS 侧重核废料嬗变,是比较合理的选择。考虑到我国核废料累积的增长速度,ADS 系统在 2035 年左右投入实际使用是必要的,因此必须加快部署和推动 ADS 的研发进程。

2010 年 3 月 31 日国务院第 105 次常务会议,审议并原则同意中科院提出的“创新 2020”规划,其中一项重要举措就是实施战略性先导科技专项。经过 2009—2010 年全面深入的酝酿和凝练,并经数轮高层次专家的咨询评议,2011 年 1 月 11 日的中科院院长办公会议审议批准“未来先进核裂变能”作为 A 类战略性先导科技专项实施。该先导专项由 ADS 嬗变系统和钍基熔盐(TMSR)核能系统两大部分组成。其中 ADS 嬗变系统面向我国核能发展战略需求,针对核裂变能可持续发展中核废料安全处置这一世界性难题,以 ADS 嬗变核废料为切入点,开展相关科学问题和关键技术问题的前瞻基础研究,同时建设创新团队和配套科研基地。

“ADS 嬗变系统”设总体方案及相关基础研究、质子直线加速器、液态金属散裂靶、铅铋冷却反应堆、平台及配套设施 5 个研究项目,主要由近代物理所、高能物理所、合肥物质科学院承担,院内其他相关研究单位参与。

“ADS 嬗变系统”的最终目标是建成一个可用于工业推广的核废料 ADS 嬗变示范装置,包含强流质子加速器、液态金属散裂靶和液态金属冷却次临界堆 3 大子系统。考虑到其巨大的技术挑战性,计划分 3 阶段实施,如图 3 所示。

第一阶段,主要是围绕 ADS 系统技术路线的选择开展研究。内容包括:搭建各种分立的小型实验系统,对相关科学问题和技术难点进行攻关,确定各系统技术路线;建成加速器、散裂靶、反应堆系统各自集成的子系统装置,主要设计指标为加速器

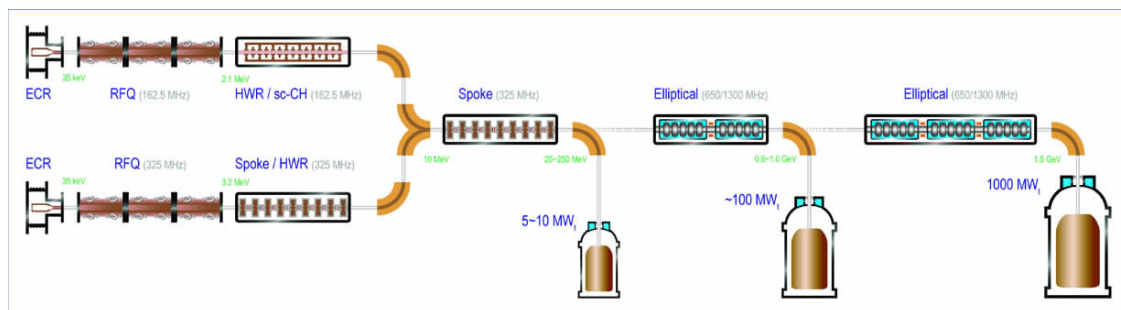


图 3 ADS 嬗变系统的研究发展路线图



质子束功率(<250)MeV/(<10)mA、反应堆功率($5-10$)MW_t;同时建成与之配套的超导测试平台、基本放化与核材料研究综合平台、铅铋堆芯模拟综合实验平台、ADS 专用设计与数据库平台、综合测调支撑平台等条件支撑设施。

第二阶段,完成设计指标为质子束功率($0.6-1.0$)GeV/10mA、堆功率约 100MW_t 的 ADS 实验装置建设。

第三阶段,完成设计指标为质子束功率约 1.5GeV/10mA、堆功率 1 000MW_t 的 ADS 示范装置建设。

6 ADS 嬗变系统研究将充分发挥中科院综合优势

当前我国核工业系统承担的任务十分艰巨,一方面要在确保安全的前提下又好又快地建设新核电站,以满足我国迅猛增长的能源需求;另一方面要在引进、消化、吸收国外第三代核电技术的基础上,通过再创新形成我国自主产权的核能品牌;同时还需要研发第四代核电技术,如快中子堆、高温气冷堆等。“ADS 嬗变系统”属未来先进核能科技,具有典型的战略性、前瞻性和基础性,还需长期的大量投入。中科院建制化的研究所体系结构和齐全的学科研究布局,使其在组织协调和综合创新方面具有极强的能力,由中科院牵头组织“ADS 嬗变系统”研究,不仅可发挥其科技先导作用,也可与我国核工业系统形成合理分工、强强互补的格局。

核事业历来具有“高投入、高门槛、高回报、高风险”的特性,资源的集中配置和长期稳定支持是 ADS 嬗变系统最终取得重大突破的必要保障,其长期性和艰巨性决定了必须有效协调全国相关优势力量并形成优势互补的合作方能有所作为。ADS 嬗变系统最终形成的系统技术,也将通过向核能系统转移来实现商业化应用和推广。

在前期准备过程中,中科院先后与国内外相关研究单位就各方面的合作进行了交流与沟通。例如,在国内,与中核集团、中广核、国家核电、清华核研院等单位合作开展反应堆设计、堆工物理、反应堆安全、核数据、反应堆中子学、辐照材料、核燃料、长寿命核废料分离与放射化学等方面的研究;国际上,与比利时 SCK·CEN 开展液态金属散裂靶以及其与反应堆和加速器耦合方面的研究合作,与瑞士 PSI 开展散裂靶及辐照材料方面的合作研究,与法国国家原子能委员会(CEA)和国家科研中心(CNRS)开展强流质子加速器、放射化学、核燃料等方面的合作研究,与美国杰斐逊国家实验室(J-Lab)、橡树岭国家实验室(ORNL)等开展强流质子加速器及散裂靶方面的合作研究,与日本原子能研究开发机构(JAEA)等合作开展材料及液态金属回路方面的合作研究等等。

通过 ADS 嬗变系统的研究,将使我国在“核废料安全处置”这一解决核能高速发展所面临的瓶颈问题的研究方面达到世界领先水平,在先进核能领域形成一支国际水平的创新研究队伍,提升我国核能领域的自主创新能力,并开辟和平和长期可持续利用核能的新途径。

60 多年来,中科院曾经取得了诸如“两弹一星”等的系列重大科研成果,为我国的科技事业、国民经济和社会发展及国防建设做出了重要贡献。通过组织实施“未来先进核裂变能”战略性先导科技专项,中科院将把握历史契机,为我国核科技事业、国家能源安全和核能可持续发展再次做出重大贡献。

主要参考文献

- 1 华贲. 产业结构、能效及一次能源构成对能源强度的影响分析. 中外能源, 2010, 15(5): 1-7.
- 2 方守贤, 王乃彦, 何多慧等. 关于加速器驱动次临界系统(ADS)研发促进我国核能可持续发展的建议. 中国科学院院刊, 2009, 24(6): 641-644.

Advanced Fission Energy Program – ADS Transmutation System

Zhan Wenlong¹ Xu Hushan²

(1 Chinese Academy of Sciences 100864 Beijing 2 Institute of Modern Physics, CAS 730000 Lanzhou)

Abstract ADS (Accelerator Driven Sub-critical System) takes the spallation neutrons as the external neutron source to drive the sub-critical blanket system, has the inherent safety. With the performances of hard and wide neutron spectra, large flux, powerful transmutation ability for long-lived radiation nucleus, ADS can not only significantly reduce the radiation lifetime, level and volume, but also output extra energy so as to improve the utilization of fuel, has been universally regarded as the most promising approach to dispose the long-lived nuclear wastes. At 2011, Chinese Academy of Sciences (CAS) started the “Strategic Priority Research Program” named “Future Advanced Nuclear Fission Energy”. As one of the two parts of this program, ADS part will strive for the self-development of the series key technology from test facility to demonstrate facility, and make greater contributions to the national energy supply and sustainable development of nuclear fission energy.

Keywords nuclear energy, spent fuel, ADS, sustainable development

Zhan Wenlong Academician and vice President of the Chinese Academy of Sciences (CAS), a nuclear physicist, he was born in Xiamen, Fujian Province in Oct. 1955. In 1982, he graduated and got B.S. from Modern Physics Department of Lanzhou University. After then, he started his research career at Institute of Modern Physics, CAS. During this time, he was a visiting scholar at GANIL in France from 1986 to 1988 and visiting scientist at Columbia University (also at BNL and LBNL) in US from 1991 to 1993. He served as a vice director and director of Institute of Modern Physics, CAS, and vice director of National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou. In January 2008, he was appointed a vice president of CAS. His main research fields include the heavy ion physics and mega-science project of accelerator in the energy range from low to relativity energy. He jointed the researches of incompletely deep inelastic scattering, new isotopes synthesis, new isotopes mass measurement, the TOF prototype of RHIC-PHENIX, radioactive ion beam separator (RIBLL) and so on. Recently, He is in charge of the national key mega-science project “Cooling Storage Ring base on Heavy Ion Research Facility in Lanzhou” (HIRFL-CSR), and push the tumor therapy by heavy ion base on HIRFL. E-mail: yyli@cashq.ac.cn

詹文龙 中科院院士, 中科院副院长、党组成员, 原子核物理学家。1955 年 10 月出生于福建厦门。1982 年初毕业于兰州大学现代物理系。1982—2007 年在中科院近代物理所进行科研工作, 其中 1986—1988 年在法国大加速器国家实验室、1991—1993 年在美国哥伦比亚大学(布鲁克海文和伯克利国家实验室)做访问学者。曾任中科院近代物理所所长, 兰州重离子加速器国家实验室副主任。主要从事重离子实验核物理研究和大科学工程建造, 从 20 世纪 80 年代开始参加低能重离子反应机制研究, 80 年代中期进入中能重离子核物理研究, 主要参加放射性束物理的早期实验, 建立了具有特色的放射性束流分离装置, 开展新核素合成和奇异原子核结构研究。90 年代开始相对论重离子碰撞研究。90 年代后期负责进行国家大科学工程“兰州重离子加速器冷却储存环”的研制。近年来, 组织了基于兰州重离子加速器的重离子治癌临床研究等。E-mail: yyli@cashq.ac.cn