

# 加速器驱动次临界系统 ——先进核燃料循环的选择\*

骆鹏 王思成<sup>†</sup> 胡正国<sup>††</sup> 徐珊珊 詹文龙

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2016-07-06收到

<sup>†</sup> email: wangsicheng@impcas.ac.cn

<sup>††</sup> email: huzg@impcas.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160903

## Accelerator driven sub-critical systems

### ——a promising solution for cycling nuclear fuel

LUO Peng WANG Si-Cheng<sup>†</sup> HU Zheng-Guo<sup>††</sup> XU Hu-Shan ZHAN Wen-Long

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**摘要** 加速器驱动次临界系统(Accelerator Driven Sub-critical System, ADS)是利用加速器产生的高能强流质子束轰击重核时产生的外源中子,来驱动次临界堆芯中裂变材料发生的持续的链式反应,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,因而具有该系统所固有的安全性。ADS的中子能谱硬,通量大,能量分布宽,嬗变长寿命核素能力强,可大幅降低核废料的放射性危害,实现核废料的最少化,被国际公认为是核废料处理最有前景的技术途径。文章介绍了ADS研究的国家需求,概述了ADS技术原理及挑战,同时介绍了中国科学院战略性先导科技专项(A类)“未来先进核裂变能——ADS嬗变系统”这一研究课题实施进展情况,并对未来发展进行了展望。

**关键词** 核能, 乏燃料, 加速器驱动次临界系统(ADS), 嬗变

**Abstract** An accelerator driven sub-critical system (ADS) that utilizes spallation neutrons as an external neutron source to drive the sub-critical blanket system has inherent safety features. It is universally regarded as the most promising approach for the disposal of the long-lived nuclear wastes because of its hard and wide neutron spectra, and large flux. In addition to its ability to reduce significantly the lifetime and volume of nuclear waste, it also has the potential for nuclear fuel breeding and nuclear power generation, which could improve the utilization efficiency of nuclear fuel resource. In this paper we describe the basis principles, challenges and current status of ADS research worldwide. A brief review of the progress of China's ADS research program is then presented, followed by an overview of the outlook for future developments.

**Keywords** nuclear energy, spent fuel, accelerator driven sub-critical system, transmutation

\* 中国科学院A类战略性先导科技专项(批准号: XDA03000000)

# 1 加速器驱动次临界系统(ADS)的研发背景

## 1.1 核裂变能的快速发展

发展清洁能源是我国及全球能源可持续发展的战略选择。核裂变能是技术成熟的清洁能源,具有高效、低碳排放、安全可靠和可规模生产的突出优势,是解决未来能源供应、保障经济社会可持续发展的战略选择。我国在2007年发布了《核电中长期发展规划(2005—2020年)》。后因日本福岛核事故的影响,我国核电发展规划做了相应的调整,但发展核能在中国经济社会可持续发展中的战略地位并没有改变。根据调整后的核电发展规划,到2020年,核电在运行装机容量可达58 GW<sub>e</sub>,在建核电机组的装机容量为30 GW<sub>e</sub>。国际原子能机构(IAEA)2016年4月的统计数据显示,目前全球在运行的核电机组444座,总发电能力约386 GW<sub>e</sub>。我国在运行的核电机组33座,总发电能力28.8 GW<sub>e</sub>,在建核电机组22台。全球共有30个国家拥有核电站,2014年核电占世界总发电量的11.5%,2015年有19个国家的核电份额在15%以上,中国的核电份额~3.0%。这些数据说明我国的核电事业还有着非常巨大的发展空间。

## 1.2 乏燃料与核废料

要实现核裂变能的快速、可持续发展,在确保安全的前提下必须解决两个重大问题:核燃料的稳定可靠供应和乏燃料(尤其是其中的长寿命高放射性核废料)的安全处理和处置。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。核燃料在反应堆中发生裂变核反应释放出核能用于发电,并生成种类众多的裂变产物;同时,核燃料中的重原子(<sup>238</sup>U等)因发生中子俘获反应而生成超铀核素,钚(Pu)、镎(Np)、镅(Am)、锔(Cm)等。核燃料使用到一定程度后就需卸出,成为乏燃料。乏燃料卸出后的

最初30至50年内,其放射性毒性主要取决于裂变产物;100年以后,随着中、短寿命的核素逐渐衰变殆尽,乏燃料的放射性毒性主要来自钚等超铀核素和一些长寿命的裂变产物,需经过几万甚至几十万年的衰变,其放射性水平才能降到天然铀矿的水平。由于大多数的超铀核素的半衰期很长(从几百年至数十万年),且大多具有 $\alpha$ 粒子放射性,这些核素被列入放射性毒性分组中的极毒组或高毒组,一旦进入人体,会对组织和器官造成严重的辐射危害。因此,乏燃料的安全处置一直是核能发展过程中要面对的一个严肃问题。

以一座百万千瓦的轻水反应堆为例进行估算,每年卸出的乏燃料中包括可循环利用的<sup>235</sup>U和<sup>238</sup>U约23.75吨,钚约200公斤,中短寿命的裂变产物约1吨,次锕系核素(镎、镅、锔等)约20公斤,长寿命裂变产物约30公斤。随着我国核电站装机容量的快速增长,核废料的累积量将快速增加。按2030年非化石能源占我国一次能源消费的比例为20%估算,2030年核电装机容量将达到150—200 GW<sub>e</sub>,届时乏燃料累积存量将达到2.35万吨左右。乏燃料特别是其中的长寿命高放射性核废料的安全处理处置将成为影响我国核电可持续发展的瓶颈问题之一。

## 1.3 核燃料的“分离—嬗变”循环策略

根据乏燃料和高放射性核废料处理处置方式的差异,国际上主要有三种核燃料循环模式:一次通过的“开环”模式,铀/钚再利用(MOX燃料)的“闭式循环”模式,和“分离—嬗变”(partition—transmutation)闭式循环模式。

在“开环”模式中,乏燃料将直接作为高放射性核废料进行地质深埋。这种模式相对费用较低,特别是未对其中的钚进行分离,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。铀/钚再利用的“闭式循环”模式将乏燃料中的铀和钚分离出来,并制成混合氧化铀钚(MOX)燃料,剩下的高放射性核废料经玻璃固化等工艺处理后进行最终的地质深

埋。该循环模式可以明显提高核燃料的利用效率，同时也将大幅减小高放射性核废料的处置量。但由于次锕系核素和一些长寿命裂变核素的存在，核废料的放射性毒性需要上万年的时间才能衰变至天然铀矿的水平。

更为先进的“分离—嬗变”闭式循环的概念是20世纪90年代提出的，其核心是在铀/钚再利用闭式循环的基础上，进一步利用嬗变核反应将高放射性核废料中的次锕系核素等长寿命核素转化为中短寿命、低放射性核素或稳定核素。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300—700年内降低到普通铀矿的放射性水平，需地质深埋处理的核废料体积(玻璃固化后)减少至开环模式的1/50和铀/钚再利用闭式循环模式的1/10左右。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。次锕系核素的嬗变可在快中子反应堆和加速器驱动次临界系统(Accelerator Driven Sub-critical Systems, 简称ADS)中实现。对于快中子反应堆，由于核燃料中次锕系核素的加入，会减小有效缓发中子份额，导致小的多普勒效应以及大的正冷却剂空泡系数，从而降低临界反应堆的安全性。因此，快中子反应堆中次锕系核素的装载量受到了很大的限制<sup>[1, 2]</sup>。ADS工作在次临界模式下，其固有的安全特性可有效解决临界反应堆由于次锕系核素装载量过高导致的安全性问题，对于核燃料组分的要求也具有更多的灵活性。

## 2 加速器驱动次临界系统(ADS)

### 2.1 ADS概念的形成

ADS概念的形成最早可追溯至20世纪40年代。1941年，美国化学家Glen T. Seaborg第一个利用加速器人工合成了几微克的钚，发现了超铀元素钚的存在<sup>[3, 4]</sup>。基于Glen T. Seaborg的研究发现，美国科学家E.O. Lawrence启动了材料试验加速器(Material Test Accelerator, MTA(1950—1954年))研究计划，其目的是利用加速器增殖技

术生产用于核武器制造的钚-239。与此同时，加拿大科学家W.B. Lewis认识到加速器增殖技术在核能的开发利用中的潜在价值，于1952年启动了利用加速器技术使自然界中的钍核素生成<sup>233</sup>U，用于CANDU重水反应堆发电的研究计划。这些研究计划很快就终止了，其主要原因是大量的、高品质的铀矿在美国等国家不断被发现，使得利用加速器增殖技术生成易裂变核素这一途径不具有现实的经济可行性。1960年，Lawrence等人注册了一个用于核素生产的加速器的专利，该加速器装置使用天然的铀和钍为靶材料人工合成<sup>239</sup>Pu和<sup>233</sup>U。在20世纪60年代，我国的核科学家也曾详细探讨了加速器增殖技术，其重点是如何能生成我国比较紧缺的<sup>239</sup>Pu。经研究发现，要实现这一目的，要求加速器的流强至少是100 mA，而当时的加速器性能与技术离这一要求还相差太远。该项研究计划于1971年被终止<sup>[5]</sup>。在早期，核科学家还曾尝试探索直接利用加速器技术产生的散裂反应去嬗变次锕系核素和长寿命的裂变产物，但很快就放弃了。研究显示，通过散裂反应直接进行核废料嬗变所要求的质子束流强度约为300 mA，这远大于一台加速器在设计上所能实现的最大理论值<sup>[4]</sup>。

具有现代意义的、旨在探索先进核能系统、提高核安全和解决核废料安全处置的ADS的概念最早是由Brookhaven国家实验室H.Takahashi和G.VanTuyle领导的研究团队在80年代的后期发展起来的。1991年，Los Alamos国家实验室的C. Bowman第一个给出了嬗变装置的详细设计方案，该方案利用来自加速器的高能质子束流产生散裂中子去驱动次临界、热中子反应堆，目的是实现核废料嬗变与核能发电。此外，Brookhaven国家实验室的H.Takahashi提出了基于快中子次临界包层的设计方案，其主要目的是焚烧次锕系核素。1993年，Carlo Rubbia和他领导的工作团队提出了“能量放大器”的概念。这是一个基于铀—钚循环的次临界核能系统，通过一个强流质子加速器产生的外中子源驱动进行核能发电，同时大大减少次锕系核素和长寿命裂变产物的量。随

后开展了一系列实验研究,验证了加速器驱动次临界系统的原理与可行性<sup>[6,7]</sup>。

## 2.2 ADS的构成与原理

ADS系统由强流质子加速器、重金属散裂靶和次临界反应堆三大分系统组成(图1),它集成了20世纪核科学技术发展的两大工程技术——加速器和反应堆技术。其基本原理是,利用加速器产生的高能强流质子束轰击重核产生宽能谱、高通量散裂中子作为外源来驱动次临界堆芯中的裂变材料发生链式反应。散裂中子和裂变产生的中子除维持反应堆功率水平所需以及各种吸收与泄露外,余下的中子可用于核废料的嬗变或核燃料的增殖。次锕系核素与快中子发生裂变核反应,生成半衰期较短和毒性较小的裂变产物;长寿命裂变产物的嬗变主要通过热中子俘获、衰变等核反应过程生成短寿命或稳定的核素。如<sup>99</sup>Tc俘获一个中子后生成半衰期为15.8 s的<sup>100</sup>Tc,再经过 $\beta$ 衰变后变成稳定核素<sup>100</sup>Ru;<sup>129</sup>I中子俘获生成半衰期为12.4小时的<sup>130</sup>I,最终经过 $\beta$ 衰变至稳定核素<sup>130</sup>Xe。

强流质子加速器是ADS系统的驱动器,其作用是用来产生高能、强流、大功率质子束流,通过质子束流轰击散裂靶产生高通量中子来维持次临界堆内的链式反应。可供选择的质子加速器有回旋加速器和直线加速器两种。回旋加速器利用粒子在恒定磁场中回旋频率相同的原理设计而成,粒子的能量越高,所需要的回转半径越大,约束磁场越强。一般来说,这种加速器的质子束

流能量的上限是1 GeV;而因受到中心区空间电荷效应、横纵向弱聚焦、注入引出束损限制等条件的制约,这类加速器的流强很难达到10 mA。直线加速器的加速原理是让带电粒子在一条直线上连续通过多个高频加速间隙进行加速。只要有足够长的加速空间,其能量不会受到相对论效应或者机器尺寸的限制。理论上直线加速器可以加速几百毫安的强流质子,比人们所公认的回旋加速器的极限流强高至少一个量级,更适用于ADS的需求。目前采用超导技术的直线加速器技术已获得成功,束流损耗大大降低,提高了能量的传递效率,是ADS系统加速器技术的优选方案。

散裂靶是加速器和次临界堆的耦合环节,其散裂中子产额的大小决定次临界反应堆芯的能量放大系数和核废料的嬗变效率,同时中子能谱在靶表面的分布决定次临界反应堆的运行特性。根据反应机制的不同,高能质子与靶核的散裂反应可分为核内级联(intra-nuclear cascade)、退激和裂变等几个阶段。核内级联是一个直接快速反应阶段( $\sim 10^{-22}$  s),高能质子或其他轻质量入射粒子与靶核中的单个核子发生反应,通过与核子间的弹性碰撞和核子—核子的级联碰撞,将动能传递给靶核。当入射粒子的能量达到几百 MeV 时会发射出介子,质子能量达到 GeV 量级时可发射质子、中子等粒子,发射出的粒子主要沿着束流方向分布。剩余的能量将被分配给靶核内各个核子,使新生成的原子核处于高能激发态。在原子核达到平衡态退激(equilibrium decay)阶段之前,会发射出中子或散裂碎片等粒子,称为预平衡态发射(pre-equilibrium emission)。当原子核最终达到平衡态时( $\sim 10^{-16}$  s),能量被核子均匀分配,主要通过中子或轻带电粒子(氘、 $\alpha$ 粒子等)的蒸发来释放能量,出射粒子为各向同性分布。当原子核的激发能降低至核子的结合能( $\sim 8$  MeV)以下时,将通过发射 $\gamma$ 射线继续退激。除了粒子蒸发退激外,原子核也会发生裂变反应,这是两个相互竞争的反应机制。当裂变生成的裂变产物带有足够高的激发能时,也会发生粒子蒸发的退激过程。为了保证在高能质子轰击下散裂靶能够稳定产生整个

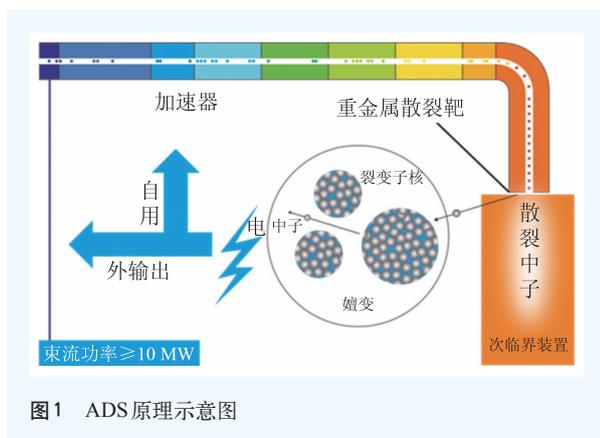


图1 ADS原理示意图

ADS系统在次临界条件下持续工作所需的中子通量和空间分布,选择易发生散裂反应的重金属如铅、铅铋合金(LBE)和钨为靶材料。一般来说,ADS散裂靶的设计要满足以下条件:(1)中子产额应尽量高;(2)能承受高的束流功率;(3)可持续运行较长时间且易于更换和维护。

ADS系统的堆芯是一个次临界、快中子反应堆。当中子能量较低时,次铀系核素的中子俘获截面远大于裂变反应截面,不利于次铀系核素的嬗变,因而快中子堆芯更有利于核废料的嬗变。ADS系统选用次临界堆芯主要是出于反应堆的安全控制和次铀系核素装载量灵活性的考虑。反应堆中核燃料裂变产生的中子分为瞬发中子和缓发中子两类。缓发中子是由部分裂变产物衰变产生的,虽然缓发中子占总产生中子的份额不足1%,但它对于临界反应堆的安全控制却起着至关重要的作用。若只有瞬发中子,当引入一个很小的正反应性时,反应堆的功率会在很短的时间内急剧增加而变得难以控制。由于缓发中子的存在,大大增加了每一代中子的平均寿命,从而有效滞缓反应堆功率的变化速度,实现对反应堆的安全控制。对于快中子临界反应堆,一般要求缓发中子的份额在0.4%—0.5%之间,这大大限制了核燃料中次铀系核素的装载量(2%—5%)。而对于次临界反应堆,则不受缓发中子份额的限制,次铀系核素的装载量高达40%—50%,甚至更高<sup>[8]</sup>。同时,由于ADS系统运行在次临界模式下,相对于临界反应堆具有更高的固有安全性。

### 2.3 ADS的技术挑战

目前世界上尚无建成ADS集成系统的先例,这在一定程度上阻碍了ADS技术的深入研究,特别是系统集成及核废料嬗变的实验验证等方面的研究。对于一个工业级的加速器驱动嬗变装置,要求加速器提供能量在800 MeV以上连续波质子束流,束流功率在10 MW以上。这相当于目前世界上质子加速器所能产生最大束流功率的十倍左右。为保证散裂靶和次临界堆的结构安全,还要

求加速器必须具有高可靠性,即加速器在长时间间隔内的失束次数必须控制在非常低的水平,这远超出了目前加速器所能达到的水平。此外,连续波运行模式及低束流损失等要求对于大功率运行的加速器来说都是一个非常大的挑战。在散裂靶方面,未来工业ADS嬗变装置需要耦合束流功率为数十兆瓦量级的散裂靶,空间功率密度可以达到反应堆的数十倍以上,热移除等问题是制约高功率散裂靶研发的核心因素。其次还需要有效地解决靶与加速器和反应堆的耦合问题,以及可工作在极端条件(高温、强辐照、腐蚀等)下的结构材料问题。ADS次临界反应堆系统面临的主要问题为散裂中子源带来的堆芯内功率分布不均匀,新型冷却剂的热工及材料相容性,加速器失束时对反应堆的热冲击,长时间强中子辐照等极端环境下的燃料元件及材料问题等。同时还要解决ADS的核燃料所涉及的乏燃料的铀、钚分离,次铀系核素的分离以及新型燃料组件的制备等难题。

## 3 ADS的发展现状及趋势

### 3.1 国外的发展现状及趋势

目前国际上关于ADS的学术交流、研讨会及科技合作日益活跃与频繁,欧盟各国以及美、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系统集成的ADS原理验证装置阶段。

欧盟联合了40多家大学和研究所等机构,充分利用现有核设施合作开展实验研究。在欧盟F6和F7框架下支持了多个研究计划的开展,如MUSE计划开展ADS中子学研究;MEGAPIE计划开展MW级液态Pb—Bi冷却的散裂靶研究;MYRRHA计划期望在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,其主要设计指标为功率85 MW<sub>th</sub>的反应堆,600 MeV/4 mA的强流加速器,铅铋合金作为靶和冷却剂;MAX计划的目的是为MYRRHA的加速器装置的最终设计方案提供第一手的实验与模

拟数据；FRERA计划主要专注于ADS系统在线反应性监测方法的实验验证。

美国1999年制订了加速器嬗变核废料的ATW计划，从2001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。当前劳斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)又提出SMART计划，研究核废料的嬗变方案。美国DOE/NNSA机构计划在乌克兰联合建造一个百千瓦级功率的ADS集成装置，但由于战争等原因，此计划仍在延迟中。费米国家实验室正在计划建造的Project-X是一台多用途的高能强流质子加速器，除用于高能物理研究外，也打算将ADS的应用纳入其中。

日本从1988年启动了最终处置核废料的OMEGA计划，后期集中于ADS开发研究。由日本原子力研究机构(JAEA)和高能加速器研究机构(KEK)联合建造的日本强流质子加速器装置(J-PARC)，计划在未来升级工程中将直线加速器能量提高到600 MeV，用于开展ADS的实验研究。

俄罗斯于20世纪90年代开展ADS研发工作，内容涉及ADS相关核参数的实验；理论研究与计算机软件开发；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和快—热熔盐次临界装置概念设计等。另外，韩国和印度等

国也都制定了ADS研究计划。

### 3.2 我国ADS研究现状及发展路线

我国从20世纪90年代起开展ADS概念研究。1995年在中国核工业总公司的支持下成立了ADS概念研究组，开展以ADS系统物理可行性和次临界堆芯物理特性为重点的研究工作。戴光曦最早于1996年分别在《科技导报》和《核物理动态》发表文章，介绍了加速器驱动核电站的概念，阐述了这一新型核能系统在核废料安全处置和运行安全性方面的潜在优势<sup>[9, 10]</sup>。中国科学院院士丁大钊、何祚庥和方守贤等科学家发表了多篇科技文章，积极推动了我国ADS技术的研究<sup>[15, 11, 12]</sup>。

1999年起实施的重点基础研究发展计划项目“加速器驱动的洁净核能系统(ADS)的物理和技术基础研究”，在强流ECR离子源、ADS专用中子和质子微观数据评价库、次临界反应堆物理和技术等方面的探索性研究中取得一系列成果，建立了快—热耦合的ADS次临界实验平台——“启明星一号”。与此同时，中国科学院还重点支持了超导加速器技术研发，并结合相关研究所的优势，部署了重大项目“ADS前期研究”。这些研究作为今后进行ADS的研发、物理验证和工业示范打下了坚实的物理技术基础。

经过2009—2010年全面深入的酝酿和凝练，中国科学院根据我国核能可持续发展的重大需求

与已有研发布局，结合国际发展态势，从技术可行性出发，提出了我国ADS发展路线图，如图2所示。

从图2可以看出，中国ADS发展可以分为三个阶段。第一阶段为原理验证阶段，即建立加速器驱动嬗变研究装置。该阶段要解决ADS系统单元关键技术问题，确定技术路线，实现小系统集成，从整机集成的层

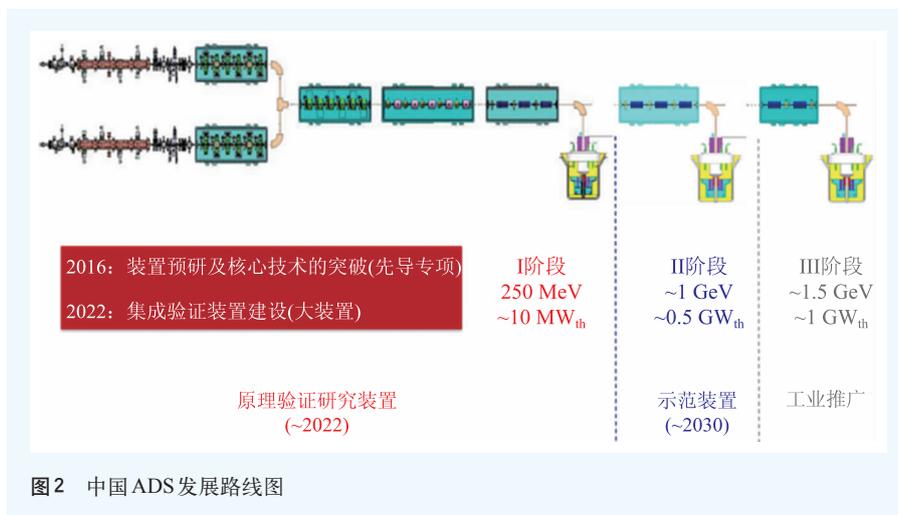


图2 中国ADS发展路线图

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 ADS 示范装置奠定基础。第二阶段为技术验证阶段,即要建立加速器驱动嬗变示范装置。加速器、散裂靶和次临界反应堆的系统指标提升,建成~1 GeV@10 mA/CW 连续束模式加速器驱动~0.5 GW<sub>th</sub>的次临界堆系统,系统可靠性提升,可用性>75%,达工业级要求。实现工程技术验证的核心是要解决可靠性、燃料和材料问题,确定工业推广装置的燃料和材料选择。第三阶段为工业推广阶段,该阶段以企业为主导,将加速器驱动嬗变系统放大至约 GW<sub>th</sub>量级,实现运行可靠性和系统经济性的验证,进行工业应用。

2011年1月,中国科学院适时启动了 ADS 先导专项,由近代物理研究所、高能物理研究所、合肥物质科学研究院承担,并联合院内外其他相关研究单位共同开展 ADS 第一阶段的原理验证研究,着力解决 ADS 系统中的各单项关键技术问题,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。在先导专项的基础上,利用“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,简称 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 ADS 示范装置奠定基础。

## 4 ADS 先导专项研发进展

### 4.1 ADS 单项技术突破

ADS 超导质子直线加速器系统的各单项技术已实现突破,开始向系统集成研究阶段转换。在单项技术突破方面,成功研制了高稳定度的强流质子源;162.5 MHz@2.1 MeV ADS 射频四极加速器是国际上第二个超过 10 mA 的连续波质子束射频四极加速器,也是目前国际上稳定运行的连续波离子束射频四极加速器中束流强度最高的;325 MHz @3.2 MeV ADS 射频四极加速器束流平

均功率位于世界最高;研制的 Spoke 超导腔的测试性能指标达到了国际先进水平。在系统集成方面,实现了 7 个超导腔稳定加速能量为 6.05 MeV、流强为 10.4 mA 的脉冲质子束,是国际上首台由多个 Spoke 超导腔构成的低能量段加速装置;实现连续波模式运行,束流强度达到 3.9 mA,最长运行记录为 7.5 小时,标志着我国在 ADS 系统研究领域的创新研发能力达到国际领先水平。

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。该方案融合了固态靶和液态靶的优点,通过固体小球的流动实现了靶区外的冷却,规避了液态铅铋合金靶放射产物毒害性高、温度—材料腐蚀效应严重以及固态靶热移除难等缺点,物理上具有承受几十兆瓦束流功率的可行性。基于颗粒流靶的各项技术验证及台架实验现已全面启动。在 ADS 次临界反应堆的研究中,已初步完成铅铋堆芯的总体设计,全面启动了初步工程设计。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。

在材料研究方面,自主配方、自主研制的 SIMP 钢是一种新型抗辐射、抗腐蚀的低活化耐热合金结构材料,其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。目前已实现 5 吨级工业规模制备;同时开展了 SiC 复合纤维材料研发,完成碳化硅纤维纺丝和不熔化装置设计、加工和组装。在核燃料制备方面,完成了铀纳米材料的制备和系列铜系有机化合物晶体的合成。

### 4.2 “加速器驱动嬗变研究装置”项目正式立项

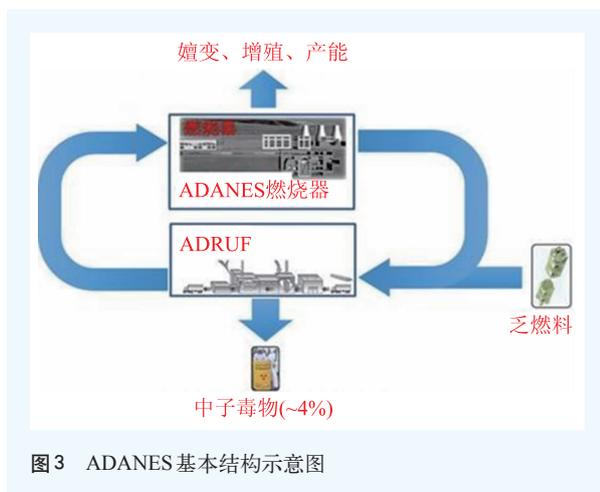
2015年12月,国家发改委正式批准“加速器驱动嬗变研究装置”(China Initiative Accelerator Driven System,简称 CIADS)的立项。CIADS 是国家“十二五”期间优先安排建设的 16 个重大科技基础设施之一。其主要设计指标为:强流质子加速器质子束流能量 250 MeV、束流强度 10 mA,

实现连续波(CW)工作模式,并具备可升级到更高能量的能力;高功率颗粒流散裂靶最大可承载质子束流功率2.5 MW,具备与加速器和次临界堆耦合工作的能力;液态铅铋次临界堆在加速器中子源驱动下的最大热功率可达10 MW(含质子束流功率2.5 MW),并留有实验孔道开展嬗变等相关实验研究。CIADS建成后将成为世界上首个兆瓦级加速器驱动次临界系统研究装置。目前,CIADS项目建设地点已确定为广东省惠州市惠东县东南沿海,中国科学院已同广东省人民政府签署协议,并成立院省领导小组,共同推进项目建设。

#### 4.3 加速器驱动先进核能系统(ADANES)新概念的形

随着ADS先导专项研究的推进和各项突破性科研成果的取得,对于ADS系统在核燃料增殖和产能方面的巨大潜力的认识和理解也愈加深入。进而,ADS研究团队对ADS发展路线进行了认真而又审慎的再思考,在一系列原理模拟验证和技术路线深入调研的基础上,科研人员勇于突破原有的发展思路,创造性地提出了“加速器驱动先进核能系统(Accelerator Driven Advanced Nuclear Energy System, ADANES)”的全新概念和研究方案。

ADANES系统主要包括两大核心部分(图



3):一是ADANES燃烧器,即ADS系统,利用加速器产生的高能离子轰击散裂靶产生高通量、硬能谱中子驱动次临界堆芯运行;二是面向ADANES燃烧器的乏燃料再生循环系统(Accelerator Driven Recycle of Used Fuel, ADRUF),主要包括乏燃料后处理和嬗变元件的制造,变“分离—嬗变”为排除部分裂变产物(中子毒物)。相对于现有的“分离—嬗变”的流程,极大地简化了工艺,不需要将铀、钚和锕系等放射性核素逐一分离后再制成嬗变元件,从而免除了核扩散的风险。通过高温挥发法,经多次的高温氧化还原流程,可以从乏燃料中除去挥发性裂变产物(I, Xe, Kr等)和一些半挥发性核素或其氧化物(Cs, Te, Mo等)。排除部分裂变产物的乏燃料,再采用无水提取法分离出裂变产物中的Gd, Nd, Sm等中子吸收截面较大的稀土元素,最后制成可用于ADS系统的再生核燃料元件。ADANES是集核废料的嬗变、核燃料的增殖、核能发电于一体的先进核燃料闭式循环技术,在减小次锕系核素含量的同时进行燃料的增殖。在ADANES系统的流程中不产生多余的放射性废物,并可在核废料嬗变的同时进行核能发电,可将铀资源利用率由当前不到1%提高到约95%,处理后核废料量不到乏燃料量的4%,放射性寿命也由数十万年缩短到约500年,使裂变核能成为可持续数千年并且安全、清洁的战略能源。目前,ADANES相关研究及项目推进工作正有序开展。

## 5 ADS未来展望

ADS系统是为解决核裂变能可持续发展所面临的核废料安全处理处置而提出来的,ADS系统除在核废料嬗变方面有独特的优势,其在增殖和产能方面也有巨大的潜力。在中国科学院先导专项实施的基础上,进而提出了ADANES的全新概念和方案,并基本完成了原理的模拟试验验证。ADANES将充分发挥ADS系统增殖和产能的潜力,提高核能资源的利用效率,使基于铀资源的核裂变能成为可持续数千年的低碳排

放、安全可靠、高性价比、防核扩散的战略能源，应成为我国 ADS 研究的未来发展方向。如果得到国家及时和稳定的支持，有望在 2022 年左右基本完成乏燃料循环利用验证以及 ADS 燃

烧器原理样机(10 MW<sub>th</sub>)等阶段性工作，引领国际核裂变能的创新发展，并在 2030 年左右实现工业级示范。

### 参考文献

- [1] Wakabayashi T *et al.* Nuclear Technology, 1997, 118: 14
- [2] IAEA. Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management, IAEA-TECDOC-435, 2004
- [3] Kadi Y, Revol J P. Design of an Accelerator-driven System for the Destruction of Nuclear Waste. LNS0212002, 2001
- [4] Stanculescu A. Accelerator Driven Systems (ADS) and Transmutation of Nuclear Waste: Options and Trends. LNS015022, 2000
- [5] 何祚庥. 世界科技研究与发展, 1996, 6: 1
- [6] Andriamonje S *et al.* Physics Letters B, 1994, 348: 697
- [7] Arnould H *et al.* Physics Letters B, 1999, 458: 167
- [8] Abderrahim H A *et al.* WIREs Energy and Environment, 2014, 3 (1): 60
- [9] 戴光曦. 科技导报, 1996, 8: 38
- [10] 戴光曦. 核物理动态, 1996, 13(4): 53
- [11] 丁大钊, 方守贤, 何祚庥. 中国科学院院刊, 1997, (2): 116
- [12] 赵志祥, 丁大钊. 物理, 1997, 26(4): 221

ILOPE“24年”光电行业专业展会品牌，助力企业价值跃升



**ILOPE**  
www.ilope-expo.com  
**北京光电周**

**第二十一届中国国际激光、光电子及光电显示产品展览会**  
同期展会:第十三届中国国际机器视觉展览会暨机器视觉技术及工业应用研讨会

2016年10月17日-19日  
北京·中国国际展览中心（静安庄馆）

◆激光◆红外◆光学材料◆光电显示及照明

**展位抢定，请立即洽询：**  
 **010-84600314 / 84600836**  
展馆地址：北京市朝阳区北三环东路6号  
**ILOPE新版网站全面升级，欢迎登陆 [www.ilope-expo.com](http://www.ilope-expo.com) 了解参展参观详情！**





官方微信 欢迎关注