

加速器驱动次临界系统(ADS)与核能可持续发展

赵志祥, 夏海鸿

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

[摘要] 核废物最少化是核裂变能可持续发展的关键问题。加速器驱动次临界系统(ADS)是一种高效的核废物嬗变器(或焚烧炉),是解决核废物的关键技术。文章主要介绍了 ADS 的基本原理及其对先进加速器、先进冷却性技术等方面的带动作用,并对各国 ADS 的研究现状进行了比较,最后提出了 ADS 发展必须解决的关键问题及其与国内核能发展的关系。

[关键词] 核能; ADS; 嬗变

[中图分类号] X771 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)03-0066-07

1 ADS 在我国核能可持续发展战略中的作用及地位

1.1 核废物最少化是核能可持续发展必须解决的关键问题之一

核废物问题是核能可持续发展的制约因素之一,尤其是乏燃料和高放废物(乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体)的管理,长期以来一直是社会和公众极其关注的焦点。

一座 100 万 kW 的压水堆(PWR)电站,每年卸出乏燃料约 25 t;其中含有可循环利用的铀约 23.75 t,钚约 200 kg,中短寿命的裂变产物(FPs)约 1 000 kg;还有次锕系核素(MAs)约 20 kg,长寿命裂变产物(LLFPs)约 30 kg,这些核废物寿命长、放射毒性大,对人类环境构成长期危害。

如何实现废物最少化,即最大限度地减少核电站运行产生的高放废物的体积及其放射毒性,并将高放废物安全处置,使之可靠地与生物圈长期隔离,确保子孙后代的环境安全,是关系到核能可持续发展和影响公众对核能接受度的关键问题之一,也是一个重大的世界性难题。

根据 2020 年我国核电装机容量为 40 GWe(运行)和 18 GWe(在建)的发展目标,预计我国乏燃料累积存量到 2020 年将达到 6 000 ~ 10 000 t。如果 2030 年的核电装机容量达到 80 ~ 100 GWe,则届时乏燃料累积存量将达到 20 000 ~ 25 000 t,其中含钚为 160 ~ 200 t,含 MAs 为 16 ~ 20 t,含 LLFPs 为 24 ~ 30 t。

对于今后我国核电运行将产生的日益增多的乏燃料,如何以核废物最少化为指导原则,妥善处理、处置我国核电运行过程中产生的高放废物,以保证我国核能的可持续发展,将是一个必须解决的重大问题。

1.2 分离-嬗变(P&T)战略

国际上对乏燃料的管理有两条技术路线或两种循环方式,即“一次通过”循环方式和闭式燃料循环方式。

“一次通过”循环方式是指乏燃料经过适当包装和储存之后,直接进行地质处置。“一次通过”循环是较为简单的核燃料循环方式,存在如下问题:铀资源利用率低(<1%),产生的废物量大,废物所需安全处置的时间长。

闭式燃料循环方式指乏燃料经过后处理分离,将回收的铀和钚放到反应堆中循环使用。分离-嬗变战略是 20 世纪 90 年代以来发展起来的,是国际上开发的先进的闭式燃料循环,它是在回收利用铀和钚的

[收稿日期] 2007-08-18

[作者简介] 赵志祥(1950-),男,黑龙江齐齐哈尔市人,中国原子能科学研究院教授,研究方向:ADS 和中子物理学

基础上,进一步将 MAs(如镓、镉、铜等)和 LLFPs(如镱、碘等)分离出来,在嬗变装置中进行嬗变。

先进核燃料循环战略的实施,将在充分利用铀资源的同时,实现核废物体积和毒性的最小化,从而保证核能的可持续发展。

值得注意的是,美国作为多年来“一次通过”循环方式的积极鼓吹者,近年来其核燃料循环政策发生了根本性逆转。从其自身的核能发展战略需要出发,美国布什政府于 2006 年 2 月提出了“全球核能合作伙伴”倡议。该倡议否定了当年卡特政府的核燃料“一次通过”的核能政策,恢复包括后处理和快堆在内的核燃料闭式循环方案。

1.3 ADS 是理想的长寿命放射性废物焚烧炉

ADS 由中能强流质子加速器、外源中子产生靶和次临界反应堆构成,是一种高效的核废物嬗变器(或焚烧炉)。ADS 的基本原理如下:由加速器产生的质子束流轰击设在次临界堆中的重金属靶件(如液态 Pb 或 Pb-Bi 合金),引起散裂反应,再通过核内级联和核外级联产生中子,1 个能量为 1 GeV 的质子在厚靶上约产生 30 个中子,散裂中子靶为次临界堆提供外源中子。

一个系统的嬗变能力和增殖能力主要由两个因素所决定:一是除了维持系统自持和考虑各种吸收及泄漏外的中子余额数目;另一个是系统嬗变或增殖每个核所消耗的中子数目。

与临界堆相比,ADS 有两个最重要的特点。第一,由于 ADS 有外源中子,其中子余额数目明显地多于临界堆,因此其核燃料的增殖能力和核废料的嬗变能力明显强于其他所有已知的临界堆。研究表明,ADS 的嬗变支持比可达到 12 左右。第二,由于 ADS 的能谱很硬,几乎所有长寿命的锕系核素在 ADS 中都成为可裂变的资源,因此 ADS 系统中锕系核素的中子经济性明显好于其他所有已知的临界堆。计算表明,在 ADS 能谱下,几乎所有的锕系核素的净中子产生率均为正值。

ADS 具有良好的安全性,其燃料中对 MAs 的装载量没有严格的限制。在所有已知的嬗变系统中,ADS 是最理想的核废物焚烧炉。

1.4 ADS 研发对其他技术的带动作用

ADS 可提供具有灵活时间脉冲化特性和新的运行模式的强中子源,成为中子科学研究的重要平台。这一平台将为聚变堆材料研究提供机会,也将在中子散射技术发展、同位素生产、中子活化分

析、中子照相、辐照治疗等方面发挥作用。

ADS 的开发将在先进加速器技术、先进的冷却剂技术、高功率靶技术、次临界反应堆技术等领域进行技术积累。

ADS 为钍资源的利用开辟了一个有前景的途径。

2 国际研究现状和国内研究工作的进展

2.1 国际研究现状

自 20 世纪 90 年代初以来,ADS 开始成为国际核科技研究的热点。国际核科技界认为 ADS 是一条有前途的新一代核能开发的技术路线。国际原子能机构把它列入新型核能系统中,称之为“新出现的核废物嬗变及能量产生的核能系统”,并已将其纳入国际原子能机构的快堆与 ADS 技术工作组的年会内容。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,已从概念研究进入对物理过程、技术部件的研究及核能系统集成的概念研究。

2.1.1 欧盟

欧盟把 ADS 作为核废料处理和处置的主要课题,设立了由 7 个国家共 16 位科学家组成的以诺贝尔奖获得者 Rubbia 为首的顾问组,制订了研究开发计划框架。按 2000 年统计,投入人力约 400 人/年。研究范围涉及强流加速器技术、中高能核数据、中子学设计程序研究、热工水力设计程序研究、散裂靶物理,以及工业规模验证装置设计等。

在欧盟框架计划的指导下各国也有相应的国家研究计划,按照法国 1991 年法律文本中关于核废物管理的内容,研究单位和工业部门都参与 ADS 的研究与发展。在基础性研究方面涵盖 ADS 各个方面。在外源驱动次临界堆物理方面,利用发展钠冷却中子电站建造的大型零功率装置 MASURCA 与 GENE-PI 中子发生器结合,实施了 MUSE 计划,与意大利、日本等国合作,开展大量的各种可供选择的冷却剂(Na,Pb,He)的模拟实验。工业部门也参与核废料嬗变相关燃料循环的研究,致力于 ADS 工业规模实验装置设计研究。

MYRRHA 为多用途小尺寸 ADS 装置的英文缩写,由比利时提出,计划将用它来替代现有的研究堆 BR-2,用于材料和燃料元件研究、同位素生产以及用于嬗变和生物应用研究。MYRRHA 计划的核心是由加速器驱动的铅-铋冷却的快中子次临界系

统。MYRRHA 计划开始是多边合作项目,后来演变为欧洲共同体第 6 框架的研究项目。2005 年,比利时提交了 MYRRHA 计划的初步设计文件。

欧盟各国 ADS 研究开发工作的特点是充分利用现有的核设施,共同合作开展实验研究,其中比较突出的是利用法国的大型快中子零功率实验装置开展 ADS 中子学研究的 MUSE 计划、利用瑞士 PSI 的强流质子加速器开展 MW 级液态 Pb - Bi 冷却的散裂靶研究的 MEGAPIE 计划、利用法国凤凰快中子反应堆开展含 MAs 或 LLFPs 的燃料元件在中子辐照条件下的行为研究等。

2.1.2 俄罗斯

俄罗斯的 ADS 开发工作是从 20 世纪 90 年代理论物理研究所同美国 LANL 的合作开始。1998 年俄罗斯原子能工业部决定启动 ADS 开发计划,组建了以理论实验物理研究所和物理与动力工程研究所为代表、有 10 多个单位参加的工作组,拟定研究计划,在 ISTC 的支持下,协同开展工作。工作内容包包括:ADS 相关核参数的实验研究,理论与计算软件开发,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。

2.1.3 美国

美国于 1999 年在能源部的领导下,制订了加速器嬗变核废料工艺的路线图,称为 ATW 计划。由于美国早先致力于加速器生产氙的 APT 计划,在强流质子加速器方面有较多的技术储备,有利于 ATW 计划的实施。次临界堆芯研究设计过多种热中子和快中子系统方案,最后选中快中子次临界堆芯。从 2001 财政年度开始,美国正式实施先进加速器技术应用的 AAA 计划。在 AAA 计划内全面开展 ADS 相关的研究工作,并计划在 2010 年左右建成一座加速器驱动的实验装置 ADTF,用于证实 ADS 安全性、加速器与散裂靶及次临界增殖系统之间耦合的有效性、嬗变性能和可运行性。现在,ADS 研究是美国先进核燃料循环系统 AFCI 的有机组成部分。

美国与俄罗斯合作已建成了实用规模的 Pb - Bi 液态合金回路,并在结构材料腐蚀控制问题上取得进展,同时还开展了工业规模的 ADS 工程概念设计,公开发表钠冷、Pb - Bi 冷和气冷 3 个设计研究。

2.1.4 日本

日本从 1988 年 10 月就启动了最终处置核废料的长期研究与发展计划,称为 OMEGA 计划,由 3 个主要的核能科学工程研究设计单位负责实施该项目,它们是日本原子能研究所、日本燃料循环发展研究所和中央电力工业研究所。日本除广泛开展 ADS 相关的基础研究外,还开展了以工程概念设计研究带动相关的以工程实现为目标的技术开发研究。在研究比较了临界焚烧炉 ABR 和 ADS 的性能之后,研究者认为 ADS 是 MAs 嬗变的最佳选择,所以 OMEGA 后期的研究工作集中在 ADS 的开发研究上,先后完成了钠冷却固体钨靶和 Pb - Bi 冷却液体靶 2 个工业规模级,820 MW 热功率的概念设计。

日本还同时开展了具有工业规模的散裂靶和次临界堆融为一体的熔盐 ADS 概念设计研究。围绕这些工业概念设计还开展了分离流程、燃料加工和后处理、Pb - Bi 工艺和专用核数据库及计算程序研究开发工作。

最近,日本开始实施中子科学计划 J - PARC,由日本原子能所和高能所联合建造强流质子加速器,用以驱动全尺寸的 ADS 系统,使用 Pb - Bi 液态合金靶。该计划分 3 个阶段实施:第一阶段束功率 200 kW,次临界堆芯用 20 % ²³⁵U 氧化物为燃料,裂变功率可达 50 kW,用强迫空气冷却;第二阶段束功率提高到 2 MW,次临界堆芯功率拟提高到 500 kW,用自然循环 Pb - Bi 液态合金冷却;第三阶段以实证 ADS 工艺安全和嬗变性能为目的,束功率拟提高到 50 MW,次临界第一个堆芯仍用 20 % ²³⁵U 的氧化物燃料,第二个堆芯拟用专用于工业实用 ADS 的氮化物燃料。

总体看来,国际上 ADS 是很活跃的核能研究开发项目,不仅列入国家级中长期发展计划,而且差不多整个核能研究机构和有关的工业部门都参与开发研究,其共同特点是:充分利用已有核能研究开发设施开展实验工作,其中以欧盟和俄罗斯最为明显;重视国际合作,以欧盟、美国、日本和韩国共同参加的中子学研究的 MUSE 计划和散裂靶的 MEGAPIE 计划最具代表性;各国都有建设 ADS 集成实验装置的计划,如欧盟的 XADS 和 MYRRHA,俄罗斯的 SAD 和美国的 ADTF 等;各国都结合本国核能发展的实际情况,开展工业规模实用化的 ADS 设计研究,而且都设想在 2030 年左右建成原型装置。

2.2 国内研究现状和主要进展

我国在 1996 年至 1999 年间在中国核工业集团

公司和国家自然科学基金会的支持下开展了 ADS 研究概念研究和物理可行性研究。1999 年科技部的国家重点基础研究发展规划项目(“九七三”计划)中立项,开展为期 5 年的“ADS 物理和技术基础研究”,由中国原子能科学研究所和中国科学院高能物理研究所共同承担。

与先进核能国家比较,我国的 ADS 研究起步较晚,投入较少,研究资源缺少,但由于充分利用了承担单位的技术积累、很好地借鉴了国外的先进经验并且充分发挥了科研人员的积极性和创造性,目前我国 ADS 研究整体上达到国际水平,有些已经达到国际先进水平,得到了国际同行的认可,保持了与国际同步的研究态势。

国内研究工作的主要进展包括:建立了快-热耦合的 ADS 次临界实验平台——“启明星一号”;建成了输出能量为 3.5 MeV、输出脉冲流强为 43 mA 的强流质子 RFQ 加速器;建成了输出能量为 75 keV、输出流强大于 65 mA 的强流 ECR 离子源;建立和配套了 ADS 中子学研究专用计算机软件系统并开展了 ADS 工程概念优化方案计算;建成了 ADS 专用中子和质子微观数据评价库;创造性地进行了专用材料的辐照效应研究及其与液态金属冷却剂(Na 和 Pb-Bi 合金)的相容性研究;在核废料核素的中子学价值、ADS 特有的辐射防护问题、ADS 系统的热工水力问题等方面,也开展了一系列的探索性的研究,取得了积极成果。

总的来说,国内研究处于基础研究向小规模系统集成过渡阶段。

3 ADS 发展必须解决的技术关键问题

3.1 确定系统主要的技术选择

3.1.1 系统大小和布局

用 1 个大功率加速器驱动 1 个或几个嬗变装置要比用几个产生同样束功率的小加速器驱动 1 个嬗变装置花钱少。但另一方面,由几个小加速器来驱动 1 个嬗变装置可以提高系统的可靠性和可使用率。要将造价、运行费用这些因素与可靠性、可使用率、可运行性等因素进行平衡考虑。

带有燃料处理厂的 ADS 单元可以满足减少高放废料运输的要求。先进的液体金属堆研究更倾向于模块式的、中等大小的、工厂安装好的、铁路可运输的反应堆。需要对 ADS 系统的大小和布局进行最佳化,应考虑技术风险和每一构成大小的费用,以及各

构成的最佳合成。

3.1.2 加速器选型

目前国际上主流的姿态是选用直线型加速器作为驱动加速器,这是达到 20~100 MW 级束功率的唯一可能的选择。但如果采用几个小加速器驱动嬗变装置的方案,圆形加速器也是可能的选择。同样应该将造价、运行费用、系统的可靠性和可使用率、可运行性、技术风险等因素进行平衡。

3.1.3 次临界系统主要参数的选择

首先需要确定燃料类型是固体的形式还是液体的形式;其次通过提高系统的运行温度来提高热力学效率,减少结构材料的机械阻抗,但高的温度对材料的相容性提出挑战,要研究确定最佳反应堆运行条件,平衡售电收入的增加和风险的增加及达到较高温度所要求的 R&D 费用的增加;最后需要从安全性和经济性的角度确定最佳的次临界度。

3.1.4 靶和冷却剂材料的选择

怎样给几个 MW 功率级的散裂靶导热是最大的问题,液态金属靶可能是唯一的技术选择。液态铅铋合金(LBE)和铅与钠相比具有中子产额高、安全性好等明显优点,PSI 的 MAGPIE 计划已经取得了明显的进展。

采用 LBE、铅、钠和氦气体做冷却剂都可以获得快中子能谱。目前大多数国际研究计划倾向于液体金属冷却的次临界装置。技术选择应该在 LBE 冷却和钠冷间进行。两种方式各有优缺点,但做最后的决定研究还不充分,研究应针对两种选择的安全性、费用等方面作进一步的考量。

3.1.5 燃料元件和待嬗变的 HLW 元件的形式

燃料嬗变的份额和燃料的成分将会影响包括中子学、燃耗行为、安全和高温化学等方面的特性。元件中装载较高的 TRU 和裂变产物将减少化学过程的复杂性,但会损失在辐照性质和中子学方面的特性。较低的循环嬗变将减少嬗变的震荡和相关控制上的要求,但要求更多的燃料再循环步骤。需研究确定一次通过装置是否可行或是否需要再循环的步骤。

3.1.6 后处理工艺流程

采用水法和干法处理乏燃料各有优缺点,应该评估每种方法的费用和技术风险。

以上 ADS 的主要技术选择应该在掌握单元关键技术的基础上及早做出。

3.2 强流加速器关键技术

10~100 MW 量级束功率的强流中能加速器在

物理基础方面的难点在于解决强流束加速与传输中的束晕形成和束流损失问题,在工程技术方面的难点是提高加速器运行的可靠性和可使用率。

需要发展减少束流损失的技术,目标是将束流损失控制在 $1\text{W}/\text{m}$ 以内,以降低辐射防护的要求,提高系统的可维护性。需要进行束流动力学分析和模拟以评价光学匹配的要求,使束晕最小。需要发展束流损失小的加速结构。

需要发展提高束流可靠性的技术,目的是将束流频率比现在运行的大多数加速器降低 $3\sim 4$ 个数量级,减少加速器的失束对元件的热冲击。通过分析、发展硬件来解决束流可靠性的问题,要评估设备和子系统失效的原因,如何防止失效及恢复,系统设计要提供余度。

3.3 高功率散裂靶和冷却剂关键技术

如前所述,LBE或液态铅是几个MW级束功率下散裂靶比较可能的选择。R&D工作应该主要围绕LBE或液铅进行。

需要解决的关键问题包括:辐照性能、机械性能、导热性能、抗腐蚀性能好的靶窗和靶结构材料的评价和选择;LBE或液铅的热工水力特性研究;流致振动问题研究等等。

钠冷却剂技术经过几十年的发展已经比较成熟,没有明显的化学问题和材料相容性问题要在R&D阶段解决。

需要研究掌握LBE冷却剂的关键技术,包括研究化学控制技术的LBE回路的设计和运行、材料相容性和热传导及流动性质。LBE化学的研究包括控制LBE中氧的含量,解决 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下材料是否与LBE相容的问题。

为了突破上述关键技术,建立一个到两个适当规模的LBE试验回路以增加LBE和LBE化学的经验和技术的积累。

由于俄罗斯有将LBE用于核潜艇动力堆冷却剂的经验,而且PSI的MEGAPIE计划在LBE研究方面已经取得重要进展,因此加强国际合作对于加快掌握LBE技术是有利的。

3.4 次临界反应堆关键技术

次临界反应堆中子通量和功率水平与同型临界堆相当,因此发展次临界反应堆没有不可超越的技术障碍,技术难点集中于:a.由于能谱相当硬的点状或线状外中子源的存在,堆芯功率密度分布有严重不均匀的问题,其将导致组件热功率和中子注量率径向和

轴向峰因子的变化,如果元件的设计和冷却方面增加裕度,将会增加建造和运行的成本,因此发展次临界反应堆需要解决功率展平的问题;b.包层倍增因子提高可以降低对加速器束功率的要求,但同时也减少了安全边界及系统运行的灵活性,需要通过优化设计找到最佳的平衡;c.元件和结构材料方面需要解决的问题有:由于采用LBE冷却剂带来的强腐蚀问题和特殊的热工水力和流致振动问题,由于加速器失束带来热冲击问题,由于能耗加深带来的元件问题,由于能谱更硬、中子通量更高带来的材料的辐照损伤问题等;d.作为嬗变装置,包层中将安排主要由MAs和LLFPs组成的嬗变元器件,需要研究其对堆芯性能的影响和因此带来的特殊安全问题。

开展上述研究需要引进开发、建立和检验大量的计算机模拟与计算工具。在一定的阶段,建立1个几MW热功率次临界实验装置以检验设计和进行技术的集成是非常必要的。

3.5 ADS后处理关键技术

涉及满足增殖和嬗变时,要求进行PWR和快堆乏燃料处理研究,目标是能有效从ADS乏燃料中分离铀、钚,MAs,Tc,I。还涉及ADS燃料后处理研究,目标是从辐照后的ADS燃料中回收未嬗变掉的MA和LLFP及萃取新产生的裂变产物,然后通过嬗变系统再循环。

3.6 ADS研究发展所需要的核物理基础研究

需要发展适合于ADS设计研究的ADS专用核数据库和多群常数库,能量应该至少扩展到 300 MeV ,核素应该包括ADS的燃料、靶与结构材料、待在ADS中嬗变的材料。

4 解决关键技术问题的日程表

4.1 中国ADS研发活动建议的日程表

从现在起,发展ADS技术到建成全尺度的示范装置预计需要3个阶段,大约25年的时间。

在第一个5a中,应该解决ADS系统单元技术问题,包括加速器、靶、次临界堆、化学分离等问题。在这个5a结束的时候,应该能够对系统的主要参数作出选择,完成小尺度的技术集成装置的详细设计并开始建设。

在接下去的10a里,应该进行中等尺度的技术集成,建成并运行由MW级加速器束功率驱动的 30 MW 热功率的ADS实验堆,并开始进行嬗变实验。

再用10a的时间,进行全尺度的技术集成,建

成并运行全能量、降低流强的 10 MW 束功率的加速器驱动的 800 MW 热功率的示范堆,进行运行可靠性和系统经济性的验证。

由于 ADS 技术发展的不确定性,为了减少决策的风险,第一阶段的 R&D 是极其重要的。

4.2 第一阶段 5 a 计划研究内容

应围绕 ADS 关键技术突破来开展,为下一步建设 ADS 技术集成装置打好基础。具体内容包括:a. 掌握 ADS 原理验证装置初步设计的关键技术,完成可视化靶区热态流场研究,完成 ADS 安全仿真分析;b. 建设重金属(铅铋合金)热工水力实验回路,并在铅铋合金热工装置上建设铅铋合金腐蚀回路和配套测量设备等;c. 完成“启明星一号”上的次临界中子学实验研究、ADS 束功率与堆功率关系研究、长寿命核素嬗变实验研究;d. 开展高功率靶及冷却系统预研;e. 完成 ADS 专用数据库的建设和检验;f. 利用建成并运行的 RFQ 质子加速器,进一步提高其工作比,开展低能强流束传输测量与物理研究,掌握控制束流损失的关键技术,为强流加速器的稳定、可靠运行提供物理与技术基础;g. 离子源应达到的新水平为能量 75 keV,引出氢束流 > 100 mA,聚焦脉冲束发射度 $\epsilon_{n \cdot rms} \leq 0.2\pi$ mm mrad,可靠性实验运行时间 200 h,完成新的束流脉冲化方法研究;h. 系统研究模拟 ADS 工况条件下靶材料及结构材料辐照效应微观机理、与冷却剂的相容性和腐蚀机理,以及辐照与腐蚀条件下材料热物性和力学等行为,最终建立较为完整的 ADS 材料辐照效应和相容性数据库,为材料使用寿命和危险性评估、材料筛选、抗辐照和抗腐蚀新材料研制、ADS 设计提供基础数据和建设性建议;i. 完成干法后处理技术方案的筛选,确定干法后处理的主工艺路线,并开展 α 密闭铀钚分离实验的验证研究。

实现上述研究目标后,将利用可以调用的加速器资源进行小规模系统集成,建设由束流功率 100 ~ 200 kW 的强流质子加速器和热功率 5 MW 左右的热堆以及靶系统组成的小规模 ADS 系统集成装置——“启明星二号”。

5 ADS 研发与国内核能发展相关计划的关系

5.1 和快堆发展计划的关系

ADS 和快堆均具有核燃料增殖和核废料嬗变的能力,ADS 具有更高的中子余额和更硬的中子能谱,与临界快堆相比,这对增殖和嬗变更加有利。

从技术发展的角度看,快堆在技术上更加成熟,国际上已有建造和运行的经验,钠冷快堆有 300 多年的成功运行历史,LBE 冷快堆有 80 多年的历史。我国目前处于钠冷实验堆建设阶段,预计在 2035 年左右可以投入商用。对于 ADS,我国目前尚处于基础研究阶段,在国际上 10 a 之内可望建成实验堆。

研究表明,采用以加速器驱动的快堆是一种比较理想的选择。因此,快堆技术发展是 ADS 开发的一个必经阶段,并对 ADS 提供有力的技术支撑。ADS 研究将涉及新型冷却剂的开发等问题,可以推动快堆技术本身的发展。

从在我国核能可持续发展战略中的地位来看,将快堆侧重于核燃料的增殖、而 ADS 侧重于核废料的嬗变是比较合理的选择。

从能源需求的压力和大规模发展核电带来的铀资源的压力来看,快堆投入商用越早越好,越快越好。如果快堆能在 2035 年左右投入商用,应该主要发挥其增殖的能力以加快其推广的速度。如果希望快堆兼顾增殖和嬗变能力,则一是增加了在工艺上的难度,延缓其商用的时间;二是 LLFPs 的嬗变是以消耗本可用于增殖的中子为代价的,兼顾嬗变将会牺牲快堆的增殖能力,增加快堆的倍增时间,从而减缓快堆的商业推广的速度。

从技术的层面分析,ADS 由于能谱更硬、中子余额更多,是最理想的嬗变装置,1 个优化设计的 ADS 其支持比可以达到 12 左右,即部署 1 个 ADS 就可以嬗变 12 个同样规模的 PWR 核电站产生的长寿命放射性废料。ADS 装置在工程应用方面面临的重大问题驱动加速器的稳定性,但对于嬗变来说,这个问题的重要性降低了。

5.2 和聚变堆发展计划的关系

聚变堆是未来可能发挥重要作用的能源系统,从现开始在部署其开发是完全必要的。

聚变能替代裂变能的时间表取决于两个因素,一个因素是聚变堆本身技术成熟到可以商用;另一个因素是聚变能与其他能源系统相比较,在经济上必须具有竞争性,这只有在裂变能资源耗尽或燃料成本上升到无法接受的水平时才有可能。如果引入快堆,即使不考虑钍资源的利用问题,天然铀资源至少可以支持裂变能维持数百年的发展。

按照核电发展规划,到 2020 年我国核电发展目标是运行 40 GWe,再建 18 GWe。即使以后

不再新建 PWR 核电站,到 2030 年也将有 60 ~ 80 GWe 的 PWR 核电站在运行。这些核电站产生的长寿命放射性废料必须有一个安全、经济、现实的处置方案。

因此聚变能发展的计划对化学分离 + ADS 嬗变的计划并没有限制性的影响。

5.3 和核燃料循环及核废物管理及处置计划的关系

引入 ADS 实施、P&T 战略并不能消除地质储存的必要性,但会使地质储存在技术上更加容易、安全、经济。

假定 ADS 在乏燃料中去掉 99.9 % 的 TRU, 95 % 的 Tc 和 I,假定 ADS 废料形态的稀释特性与 HLW 玻璃废料形态相同,假定铀和钚的回收率 99.9 %,则 ADS 可以减少场址的有效剂量 1 000 倍。从而降低地质储存场址的要求,降低地质储存场址的费用。

乏燃料中有裂变材料,在场址核废料包装设计中的一个限制就是临界性控制。ADS 从废料中去掉了大部分裂变材料,明显减少了临界风险。

带有燃料处理厂的 ADS 单元可以减少高放废料 HLW 运输的数量降低,从而减少费用。

化学分离 + ADS 嬗变可以将待地质处置的废物量减容至少 5 倍。

6 结语

裂变能可持续发展的一个重要的限制性因素是如何解决核废物的最少化问题,分离 - 嬗变战略可以解决这一问题。

在国家“九七三”计划的支持下,国内已经形成了一支 ADS 的研发力量,并有很好的研究基础,形成了与国际研究基本同步的态势,中断这一研究工作甚为可惜,应该继续从多种渠道支持开展 ADS 的研发。

由于 ADS 技术发展的不确定性,为了减少决策的风险,下一个 5 a 阶段的 R&D 是极其重要的。应该开展单项关键技术研究,确定系统的主要技术选择,并进行小尺度的技术集成。

为了对关键技术进行突破,在这一阶段进行重金属(铅铋合金)热工水力实验回路、“启明星二号”等实验平台的建设是非常必要的。

目前国际 ADS 研究处于从基础研究向小规模系统集成过渡的阶段,由于尚未涉及太多的商业秘密,正是开展国际合作的最佳时机。应该抓住有利时机,将 ADS 研发列入国际合作计划,大力鼓励和全方位地参与国际合作,加快对 ADS 关键技术的掌握。

Researches on ADS and the Sustainable Development of the Nuclear Energy

Zhao Zhixiang, Xia Haihong

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

[Abstract] The minimization of the nuclear waste is the key problem for the long term and sustainable nuclear energy development. Accelerator driven system (ADS) is a kind of high efficient nuclear waste transmutation machine (or incinerator), which is the key technique to solve the nuclear waste problem. The basic theory of ADS and driven influence of ADS on the advanced accelerator, advanced cooling technique, etc are introduced. Meanwhile the present research situations of ADS in some countries are compared. At last, the key problem of the ADS development and the relationship between ADS and the development of nuclear energy in China is discussed.

[Key words] nuclear energy; ADS; transmutation