

# 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<sup>\*</sup>

中国科学院学部

(北京 100864)

关键词 加速器驱动次临界系统(ADS),核能,发展

## 1 分离-嬗变是实现核能可持续发展 不可缺少的环节

目前,我国的核电事业即将进入快速发展期。根据发改委 2005 年发布的核电发展规划,2020 年核电总装机容量将达到 4 000 万千瓦,另有 1 800 万千瓦在建,核电在总发电量中所占比重将提高到 4%左右。根据对国家中长期能源发展形势和前景的分析,中国工程院在《2050 年我国的能源需求》咨询报告中指出,到 2050 年,我国核电占一次能源总量的比重要求提高至 12.5%(占电力装机容量的 20%)。

然而,人们在享受核电带来的巨大好处的同时,也不得不面对核电产生的核废料尤其是长寿命核废料的处理、处置难题,这将成为我国核电事业能否持续发展不可缺少的一环,必须从战略高度加以定位。

目前压水堆是核电的主要堆型,一座 100 万千瓦的压水堆电站,每年卸出乏燃料约 25 吨,其中含有可循环利用的铀约 23.75 吨,钚约 0.2 吨,中短寿命的裂变产物约 1

吨;还有次锕系核素约 0.02 吨和长寿命裂变产物约 0.03 吨。随着我国压水堆核电站装机容量的增长,核废料的积累量将快速增加。如果 2030 年核电装机容量达 8 000—10 000 万千瓦,届时则乏燃料累积存量将达到 2 万—2.5 万吨,其中所含钚为 160—200 吨,次锕系核素为 16—20 吨,长寿命裂变产物为 24—30 吨。

对核电站卸出乏燃料的潜在生物危害性分析表明,乏燃料的远期风险决定于其中主要的镎、镅、锔等次锕系元素(简称 MA)和长寿命裂变产物(简称 LLFP)。乏燃料中的 MA 和 LLFP 要衰变十几万年,其放射毒性才能降到天然铀矿的水平。

美国 30 多年来一直采用“一次通过”的核燃料循环方式,即将乏燃料作为高放废物直接进行地质处置。但是,将乏燃料中大量有用的资源与少量的废物一起直接处置,不仅会造成严重的资源浪费,还将大大增加废物处置的体积和放射毒性,具有长期的环境风险,不符合核能可持续发展战略。另外,高放射性核废料的地质处置库建设十分昂贵,是耗资巨大的工程。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。出于其自身的核能发展战略需要,美

<sup>\*</sup> 本文为咨询报告摘要。咨询项目专家组主要成员:方守贤、王乃彦、何多慧、何祚庥、张焕乔、杨国桢、陈和生、欧阳予、魏宝义、潘自强、阮可强、陈佳洱、沈文庆、胡仁宇、葛墨林、赵志祥、夏海鸿、顾忠茂、叶国安、傅世年、徐  
收稿日期:2009 年 9 月 29 日

布什政府于2006年2月提出了“全球核能合作伙伴”(Global Nuclear Energy Partnership, GNEP)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,主张恢复包括后处理和快堆在内的核燃料闭式循环方案。美国希望通过实施GNEP计划,将乏燃料中分离出的次锕系元素和钚在焚烧快堆中“烧掉”,使需要地质处置的高放废物体积降低50倍左右,从而使美国在21世纪只需要一座地质处置库即可满足需要。

为了实现核废物最少化,国际上早在20世纪60年代就提出了分离和嬗变(Partitioning and Transmutation, 简称P-T)的先进核燃料循环概念,即将长寿命次锕系元素和长寿命裂变产物从高放废液中分离出来,然后再进行嬗变,即利用中子引起的核反应,使其变为非放射性的或短寿命的核素。分离和嬗变可以在充分利用铀资源的同时,使需要地质处置的高放废物的体积和毒性降低1—2个数量级,这将大幅度减少高放废物运输和地质处置的费用。

我国坚持核燃料闭式循环的技术路线,商用后处理大厂的建设亦在筹划之中。后处理分离解决了铀、钚的分离,但我国对分离-嬗变(包括MA和LLFP的分离及其嬗变)的研究开发仅仅开展了一些前期工作,需要在国家层面上及早制定完整的分离-嬗变战略。

## 2 ADS是最有前景的嬗变技术之一

对次锕系元素(MA)来说,热堆的嬗变以热中子俘获反应为主,MA在嬗变过程中产生新的原子序数更高的MA。快中子引起的裂变要比热中子引起的裂变多得多。因此要有效地嬗变MA,必须采用快中子堆(FR)及加速器驱动次临界反应堆系统(ADS)等快中子嬗变装置。

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。由加速器产生的质子束流轰击设在次临界堆中的重金属散裂靶件(如液态铅或铅铋合金),引起散裂反应,为次临界堆提供外源中子。一个能量为1GeV的质子轰击厚靶,约产生30个散裂快中子,诱发次临界堆中MA的嬗变。同时,采用绝热吸收的办法,在ADS的热区可以有效地嬗变LLFPs。

与临界快堆相比,ADS系统有3个最重要的特点:

(1)由于ADS系统有外源中子,其中子余额数目明显地多于临界堆,因此其次锕系元素的嬗变能力明显优于临界快堆。研究表明,ADS的嬗变支持比(即一个ADS可以嬗变多少个同样规模的PWR核电站产生的长寿命放射性核素)可达到12左右(嬗变专用快堆的支持比约为5)。

(2)由于ADS系统的中子能谱更硬,中子平均能量达到500keV,而快堆系统的中子平均能量为300keV,这使得ADS系统的嬗变能力远高于快堆,MA在ADS系统中的裂变份额极高,几乎不产生新的更重的MA。

(3)由于ADS属于次临界装置,具有良好的安全性。快堆用于嬗变MA时,燃料元件中所允许的MA的装载量不能超过燃料总重量的5%,否则会影响快堆的安全性。ADS燃料中对MA的装载量的限制较少。

由上述几点可见,在各种嬗变系统中,ADS是强有力的核废料嬗变器(或焚烧炉),是我国核裂变能可持续发展值得探索的新技术途径,其研究成果将明显提高核能系统的资源效益和环境效益。

国际核科技界认为,ADS是一种有前途的新一代核能开发技术。国际原子能机构把它列入新型核能系统中,并称之为“新出现的核废物嬗变及能量产生的核能系统”。



中国科学院

ADS 也是国际上目前研究的一个热点。各主要核电国家均有 ADS 发展的国家计划。

美国很早就有 ATW 计划,后来演变成 AAA 计划,现在是 AFCI 计划的有机组成部分。前几年,欧盟有 ADOPT 计划,现在正在执行 IP-ADOPT 计划。我国周边国家也在大力发展分离和嬗变技术,日本有 OMEGA 计划,韩国有 HYPER 计划,印度也正在进行 ADS 的研发。目前国际态势已从概念研究进入物理过程、技术部件的研究及核能系统集成概念研究,下一步是建设小尺度系统集成装置。

快堆虽也可用来进行嬗变,但存在一些技术困难:在快堆中嬗变 MAs 时,燃料中加入 MAs 后会因动态参数的变化而使堆安全性下降。更重要的是,快堆中 LLFP 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。因此,从我国能源需求的压力和大规模发展核电带来资源的压力来看,快堆应主要用于核燃料的增殖。

从我国核能可持续发展战略中的地位来看,可以考虑发挥快堆增殖核燃料的优势和 ADS 嬗变核废物的优势。从长远看,ADS 可以与热堆核电站和快堆核电站互相补充、互相支持,一起构成大规模、可持续发展的核能发展模式。

ADS 系统的研发过程对相关领域的技术发展有很强的带动作用,也提供了可以生产核材料的可能性,并为钍资源的利用开辟一个有前景的途径。

### 3 ADS 发展必须解决的关键技术问题及时间表

在国家“973 计划”的支持下,我国 ADS 研究在起步晚、投入少的情况下,取得了一定的进展,并在国际上已有一席之地,也为今后进行 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。然而,目前国内的 ADS 研究仍处在基础研究和关键部件预研阶段,与国际上的差距还在加大。

从现在起,发展 ADS 技术到建成全尺度的示范装置,需要经历小尺度技术集成(即原理验证)、原型 ADS 建设、全尺度 ADS 工业示范 3 个阶段,约需 28 年时间。

在第一阶段的 8 年中,应该解决 ADS 系统单元关键技术问题。主要包括:研发高效率、高可靠性、束损极小的强流加速器;研发高功率铅铋合金(LBE)液态靶和冷却剂的关键技术。为了突破上述关键技术,近期建立一台低能强流加速器及一个适当规模的 LBE 试验回路,建立一个热功率几个 MW 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。

第一阶段需经费 2.57 亿元人民币,其中 ADS 系统单元技术预研 3 700 万元已得到国家“973 计划”项目的支持,小尺度的技术集成装置的建设和低能强流加速器技术开发费用共 2.2 亿元人民币尚有待落实。

在第二阶段的 10 年里,应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 30MW 热功率的 ADS 实验堆并开始进行嬗变实验。

在第三阶段的 10 年里,进行全尺度的技术集成,建成并运行全能量、降低流强的 10MW 束功率的加速器驱动的 800MW 热功率的示范堆,进行运行可靠性和系统经济性的验证。

### 4 主要建议

(1)ADS 系统是最理想的长寿命锕系核素和裂变产物的焚烧炉之一。ADS 的研发涉及加速器、次临界反应堆、热工水力、材料学、核物理等多个学科,需要组织核工业、中科院和教育部系统的多个研究院所共同

(转至 641 页)