



加速器驱动的洁净核能系统国际研究进展*

赵志祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 简述了加速器驱动的洁净核能系统的概念,评论了国际上几个重要研究计划的状况和进展,对我国开展相关的研究提出了建议.

关键词 加速器 次临界反应堆 洁净核能

分类号 TL43

1 常规裂变核能的问题及加速器驱动的洁净核能系统

根据 IAEA 的统计截至 1994 年底,世界上核电约占总发电量的 23.16%,世界主要国家的核电份额分别为:法国 75.29%,比利时 55.77%,瑞典 51.13%,瑞士 36.84%,韩国 35.48%,西班牙 34.97%,日本 30.70%,德国 29.33%,英国 25.79%,美国 21.98%,俄罗斯 11.39%. 我国核电的比例还比较小,仅为 1.49%. 我国能源体系的特点是以燃煤为主,约占一次能源消耗量的 3/4,这造成了严重的环境污染和运输压力,由于煤炭利用中 SO_2 、 NO_2 的排放,还会影响全球的气候. 有关专家预测,到下世纪中,煤、气等常规能源将不能满足我国快速发展的经济对能源的需求,其缺口将达到 20%. 这个缺口只能用核能来补充. 因而,在下个世纪,核能应该成为我国重要的补充能源.

从 70 年代开始,世界上核电站的建设速度开始放慢,近年来甚至呈停滞状态. 核能建设正遇到挑战.

目前现有的核电站均为热中子裂变堆型,本文称之为常规核能. 这种核能系统面临着的问题主要有:

(1) 它主要消耗天然丰度仅为 0.72% 的 ^{235}U , 资源利用率差. 在最理想的情况下(即

进行后处理和铀-钚多次循环), 铀资源的利用率只能达到 1.5%, 若计各种损耗, 则一般只能利用 1% 左右; (2) 产生大量的半衰期为百万年的长寿命放射性废物; (3) 由于美国三里岛事故和前苏联切尔诺贝利事故, 造成了公众对“核”的恐惧和世界范围的反核浪潮; (4) 反应堆运行过程中可产生 ^{239}Pu 、 ^{237}Np 和 $^{241,243}\text{Am}$, 这些同位素可用于军事目的, 有核扩散危险. 在上述这些问题中, (1) 和 (2) 是常规核能本身的问题, 而 (3) 和 (4) 实际是社会问题和政治问题.

中能加速器驱动的次临界反应堆(本文称之为“放射性洁净核能系统”, 即 RCNPS) 可以在很大程度上解决上述问题. RCNPS 的主要物理基础是:

流强为 10 ~ 100 mA 的中能加速器产生 ~1 GeV 的质子轰击重元素靶 (Pb、Bi、U、Th 等), 通过散裂反应每个质子可产生约 30 ~ 40 个中子. 这种散裂中子源每个中子仅消耗约 25 ~ 30 MeV 的能量. 散裂中子源提供的中子作为外源, 注入一个由燃料组件、慢化剂、冷却剂和结构材料等构成的次临界装置 (其 $k_{\text{eff}} < 1$), 经过中子的倍增, 形成稳定中子通量, 在次临界装置中增殖裂变材料、通过裂变输出能量、嬗变长寿命放射性废物、处置武器钚等.

与常规核能装置相比, RCNPS 具有下述

* 1997 - 03 - 30 收稿.

优点:(1)RCNPS 可通过燃料的自增殖烧²³⁸U 或²³²Th, 从而可以提高资源利用率几十倍. 且可以一次投料、长期运行;(2)较低的放射性废物水平,降低了放射性废物深埋储存的长期风险,且具有嬗变能力(Pu 及 MA 可作次级燃料),简化了后处理化工流程;(3)具有固有安全性,即减少对工程安全设施和操作人人为干预的依赖;(4)系统的前端和末端不会产生武器级的核材料,有防核扩散能力.

此外还必须指出,RCNPS 可以大量利用现有核工业的成熟技术,在聚变能可实际利用之前,就能形成规模,并在能源构成中占相当比例,即有技术上的可实现性.

2 国际上重要研究计划进展

将加速器引入核能体系这一思想早在50

~60年代就有人提出,但限于当时的加速器技术水平,这一思想难于实现. 80年代末~90年代初,随着加速器技术水平的提高,随着常规核能装置本身的问题越来越突出,对加速器驱动的次临界堆的研究逐渐形成国际研究热点. 召开了一系列国际会议. 1996年6月在瑞典召开的第二次加速器驱动的嬗变技术及其应用国际会议汇集了来自24个国家的207名代表. 会议参加者的学术和工作背景非常宽,涉及了核物理、加速器、堆工、核化学、材料等领域,还有一部分代表来自政府机构、国际组织和大型工业集团. 各主要工业国家都开展了这方面的研究.

美国的 ATW 计划、日本的 OMEGA 计划和欧洲的能量放大器(EA)计划的情况,在简表中给出.

国外重要研究计划简表

计划名称/国别	ATW/美国	OMEGA/日本	EA/欧洲	
次临界装置的堆型和能谱	熔盐堆热中子	固体组件快中子	熔盐堆快中子	
中子通量/n·s ⁻¹ ·cm ²	10 ¹⁶		5×10 ¹⁵	
能量增益	15	13	21	
k _{eff}		0.89	0.92	
加速器类型和指标	直线加速器 0.8 GeV 100 mA	直线加速器 1.5 GeV 39 mA	直线加速器 1.5 GeV 25 mA	回旋加速器 1 GeV 12.5 mA
中子产生靶	液态铅-铋靶	固态钨靶	液态氯盐靶	液态铅靶
嬗变能力 *	{ 等效半衰期: MA < 0.01年 FP < 15年	每年烧掉250公斤 MA		等效半衰期: “脏”钚为10年
研究状况	物理概念 经济分析	工程概念	物理概念 经济分析	

* 指回收乏燃料中的铀、钚同位素后仍残留在高放废液中长寿命放射性废物;其中,MA 为少锕系核素, FP 为裂变产物.

据称,美国能源部已经为 ATW 计划提供5 000万美元用于中能强流加速器前端的研制. ATW 计划尚待解决的问题是,液态重金属在高温情况下腐蚀效应严重及靶与高能质

子和中子相互作用产生的放射性 Po 在高温下快速释放带来的问题. 日本的 JAERI 准备建造一台1 GeV、15 MW 的质子直线加速器用于 OMEGA 计划的工程演示和其它基础研

究领域. 这一加速器的概念设计将在1997年开始, 拟定于1999年开始建造, 2003年达到在1.5 MW 的功率下运行, 以后功率逐渐提升到15 MW.

法国的长寿命放射性废物管理已经列入法国议会1991年12月通过的一项法律. 目前正进行 P-T、深埋地下、中间存储等各种技术的评估, 政府在比较各种方案的优缺点后, 将在2006年作出最后决定. 1995年 CEA 启动了一个短期的研究计划, 内容包括: 强流加速器可行性研究(halo 现象、耦合腔、束流动力学、RF); 散裂靶物理研究(中子产额和空间分布测量, 计算机程序模拟); 次临界装置物理(次临界介质中功率分布均匀性研究, 在 Geel 的电子直线加速器开展了少铀系核和裂变产物的中子截面测量); 放射性洁净的核能系统研究等.

俄罗斯的 RCNPS 研究总的印象是没有国家层次上的总体构想, 不成体系, 这可能与这方面研究的经费来源多样化有关. 一项较为系统的计划(Project-17)是在国际科学技术中心(ISTC)支持下于1994年11月启动的, 这一计划由俄罗斯12个研究单位的研究组和个人合作进行, 目标是乏燃料中铀的嬗变和军用铀的处置.

在中核总科技局支持下于1995年春在中国原子能科学研究院成立了丁大钊院士领导的 RCNPS 课题组, 开展了 RCNPS 的物理概念可行性研究和次临界装置的分析计算, 这个课题组的研究进展反映在1996年初召开的“RCNPS 研讨会”上. 该课题组研究的基本结论是: 快中子能量放大器(FEA)与热中子能量放大器(TEA)相比, 具有功率输出大、长寿命超铀放射性废物的积累水平低、裂变产物毒性影响小等优点; 这些优点在 $U \rightarrow Pu$ 系统中十分明显. 对于 $Th \rightarrow U$ 系统, TEA 和 FEA 都是可以工作的, 而对于 $U \rightarrow Pu$ 系统, FEA 则是合理的选择.

总的来说, 原子能院的 RCNPS 研究处于物理概念可行性研究阶段, 起步还不晚. 与

美、日、欧相比, 我们的主要差距在于经费和研究力量的投入都不够, 因而造成了基础性的工作较少.

3 体会和建议

3.1 RCNPS 研究的前景

RCNPS 研究涉及二十世纪两大核科学装置: 加速器和反应堆. 建立在 RCNPS 基础上的新的核能系统, 具有嬗变核废料、能量产生和系统本身放射性较为洁净以及可以大大简化核废料的最终处置的性能, 同时加速器驱动的散裂中子源本身也有着广阔的应用前景. 因而即使不考虑核扩散问题, RCNPS 研究也有着足够的正面推动力. RCNPS 研究为核能、核技术乃至整个核科学领域提供了一次机遇. RCNPS 的研究在90年代初以来进展很快, 由于 RCNPS 的发展可以大量利用现有核工业体系的成熟技术, RCNPS 很有可能先于聚变堆进入商业应用.

3.2 RCNPS 研究的国际现状和今后的方向

RCNPS 研究的目标目前呈多样化格局, 这和各国国情及核政策有关, 如美国和俄罗斯关注乏燃料中铀的嬗变和武器铀处置, 欧洲能量放大器的目标是能量产生和核废料嬗变等等. 这种多样化格局还会继续下去.

目前国际上的 RCNPS 研究处于概念设计阶段, 在同一研究目标下的概念设计亦呈多样化. 这大概是概述设计阶段不可避免的.

今后 RCNPS 研究, 将从概念设计阶段转入概念设计的实验验证阶段.

3.3 对今后工作的建议

(1) 我国是世界上少数几个自成体系的核工业国家. 我国快速发展的经济对能源需求的缺口只能靠核能来补充, 这一点已是国内核能专家的共识. 目前我国核电的比例还很小, 对于 RCNPS 这一新兴的有前途的先进的能源系统, 应该采取积极的态度. 我们有可能在核电的起步阶段就作出长远的规划, 将常规核能和 RCNPS 为一体, 规划出更为

合理的核电及燃料循环系统。

(2)在前一段工作的基础上,应该及时从物理概念可行性研究转入概念设计阶段.概念设计应充分考虑我国现有工作和技术基础、工程经验、国力和资源情况,也要充分利用国际上已取得的研究成果.根据我国国情,建议以生产能量为研究目标,这一研究目标对加速器的技术要求也相对较低(1GeV, 10~20 mA 的质子加速器).

(3)为实现上述目标,作为第一步,以十年左右的时间建一台原理性验证装置,这一

装置应该是综合性多用途的,可开展产能、嬗变、产氙的可行性验证,还可以开展核科学研究.

(4)对于强流加速器基础技术予以及早安排,作必要的技术储备.

(5)在概念设计阶段的早期,一些与工程有关的基础性工作应同步进行,如材料研究、反应的控制等.

(6)国际合作是目前 RCNPS 研究的大趋势,应该积极参与.但应该以我为主,有选择、有目的的进行.

Progress of Research and Development of Clean Nuclear Power System Driven by Accelerator in the World

ZHAO Zhixiang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The concept for the clean nuclear power system driven by accelerator is presented. The status and progresses of several projects in the world are reviewed. The suggestions for the work to be done in China are proposed.

Key Words accelerator sub-critical reactor clean nuclear power

(上接第117页)

probably creditable that as X -ray with single energy was produced in discharge process with D_2 gas, γ -ray was produced also. The γ -ray must effect the spectrum of X -ray. The existence of γ -ray provides the evidence for cold fusion.

Key Words cold fusion electrons-ions bound state X -ray with single energy γ -ray