

* 科学家论坛 *

及早开展充分利用铀资源和 放射性“洁净”的核能系统研究

丁大钊等*

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

关键词 核能发电, 铀, 资源利用, 放射性, 科学研究

核能发电在世界能源构成中已占仅次于煤发电的第 2 位。据统计, 核电占世界总发电量的 1/4 弱。一些能源消耗大国如美、日、法等约各占 22%、30%、75%, 即使如西班牙这类中等国家也约占 33%。目前由于政治原因, 各国政府对核能政策虽有所不同, 但随着今后对生态、环境保护的重视与加强, 核能必将得到进一步的发展。

1 数十年内人类仍将利用裂变能

核能是解决人类能源的最终途径, 聚变能的开发与利用将解决这一问题, 但目前离经济性的规模利用还有相当长的时间。可以预期, 近数十年人类仍将利用裂变能(以下“核能”均指裂变能)。

核能利用存在的主要问题有: (1) 资源利用度低。目前工业应用的是热中子反应堆电站, 虽其发电成本低于煤发电, 但它以铀-235 为燃料, 天然铀中占 99.3% 的铀-238 无法利用; (2) 燃烧后的乏燃料中除铀-235 及钚-239 外, 剩余的高放射性废液含大量“少数锕系核素”(MA) 及“裂变产物核素”(FP), 其中有一些半衰期长达 10^6 年以上, 成为危害生物圈的潜在因素, 其最终处理技术尚未完全解决; (3) 反应堆是临界系数大于 1 的无外源自持系统, 其安全问题尚需不断监控及改进; (4) 核不扩散要求的约束(指电站反应堆中生成的钚-239 受控制)。其中以前两者更具根本性。

利用快中子增殖堆可以使天然铀中的铀-238 转化为钚-239, 成为裂变燃料。用钚-239 或铀-235 装料启动运行数十年后, 此系统可以靠铀-238 达到“自持”, 铀资源利用度可提高 70 倍。这虽然有利于资源的利用, 但另 3 个问题则面临更严峻的挑战。而且快中子增殖堆的初始装料要以从热中子反应堆乏燃料中提取的大量工业钚库存为依托, 如热堆电站未发展到相当

* 本文作者共 6 名院士: 丁大钊 王乃彦 王方定 方守贤 何祚庥 赵仁恺
收稿日期: 1996 年 3 月 11 日, 修改稿 1996 年 3 月 22 日收到

的装机容量,快堆是不可能具工业应用规模的,而此时高放射性废液的库存已极大。对高放射性废液的处置方法,目前是将其中固化,经包装后埋入稳定的岩层中。这种后处理-固化-深埋的处置方式虽然可行,但从长远看它未解决泄入生物圈的问题。

2 世界核科技界关注的放射性“洁净”核能系统

理想的核能系统是以天然铀(或贫化铀)作为反应堆的基本装料,并使它所产生的放射性废物在系统中被嬗变为短寿命(半衰期为几十年)或稳定的核素。使系统输出的废料是短寿命低放射性废物。这就是目前世界核科学技术界大力研究的充分利用铀资源且放射性“洁净”的核能系统。这一系统的物理及放射化学基础在于:(1)利用中子核反应使不可裂变的核转化为可裂变核,并在系统中形成一个稳定的可裂变核供应储备;(2)利用化学分离流程,提取高放射性废液中的 MA 及 FP,回送到系统中,在一定条件下,MA 成为附加的能量供应资源,而 FP 则吸收中子而嬗变成为稳定核或短寿命核,即所谓的分离-嬗变(P-T)法。

这种设想的物理背景是坚实的,从核反应规律看是有充分根据的。为实现这一设想,近 5—10 年来,美、日、俄、法核科学家及近期以西欧 CERN 前所长卡·鲁比亚为首的工作组,都分别提出了种种构想及计划,其中具代表性的有美国的 ATW 计划,日本的 OMEGA 计划,法国的 SPIN 计划,俄国的 TNS 试验装置及西欧的 EA 设想。

由于所提出的问题对核能发展至关重要,因此这一研究方向越来越受到世界核科技界的关注。1992 年以来,每两年召开一次国际性 P-T 会议;国际原子能机构从 1994 年开始,每年举行专家会议进行研讨,不仅有核能大国积极参与,一些中小核能国家也对此方向相当关注,成为核科技界工程技术基础研究的热点。核能大国开发核电已有 30 余年的历史,积压了大量高放射性废物亟待处理,以克服核电进一步发展的障碍。美、俄两国则还有核不扩散及处理核裁军退役的大量钚-239 的需要。

核科技界认为最有前途的放射性“洁净”核能系统将由中能强流质子加速器(1—1.5 GeV, 数十 mA 或更高流强)与次临界装置(热中子或快中子)相耦合,结合“原址”放射化学分离流程(在厂区就近处置,避免与外界环境接触)所构成,文献中称之为 ADS(加速器驱动次临界装置)。它由中能质子在重核上散裂反应产生的“外源”中子,使次临界装置启动,在把非裂变核转换为裂变核的过程中,一方面倍增中子、输出能量,一方面留一定的中子贮备,以嬗变自生的或输入的 MA 或 FP。次临界装置的临界系数 0.95 左右,系统靠“外源”中子启动,因此原则上当加速器停止运行时,次临界装置即“熄火”,无临界事故问题。向这个系统输入的主要是天然铀等非裂变装料,输出的是电能及短寿命低放射性废物。加速器所耗电能占系统所产生电能的一小部分。次临界装置中所产生的 MA 及 FP 经“原址”放射化学分离后,在适当的条件下,在系统中被嬗变,因此没有向生物圈扩散的问题。如果设计适当,这个系统可运行相当长的时间(例如 5—10 年)而不必换料,因此该系统可有高的负荷因子。

放射性“洁净”核能系统的研究是综合性的,主要包括:

(1)中能强流质子加速器的研究。目前已达到的水平与系统所要求的指标还有一个数量级的差距,尤其在强流束的输运方面尚待从理论及技术上大量的研究。美、日、俄等国目前在研究直线型加速器,西欧则认为等时性回旋加速器可以满足 10 mA 量级束流强度的要求,而

且较为经济。

(2)“源”项中子学的研究。获取满足于次临界装置所需要的具有特定能谱、强度、空间等分布的“源”中子。从物理上涉及许多基本的核反应过程及中子输运,从技术上则是需处理好加速器与次临界装置的耦合。

(3)有外源的次临界装置的堆物理及堆工程研究。例如反应堆中的燃耗研究,中子经济学研究,临界安全研究,结构研究,热工研究等等,它将涉及系统的有效性、安全性、经济性等一系列关键问题。

(4)放射化学分离流程的研究。从乏燃料中提取铀及钚的后处理流程比较成熟,而从高放射性废液中高效分离 MA 及 FP 还是一个的新的课题。

从上述分析可以看出,“洁净”核能系统的物理基础是坚实的,技术上也不是不可及的,在现有基础上发展就可能达到要求,成为下一代核能的最佳选择。

3 当前应采取的部署

(1)我国下世纪的能源状况十分严峻,目前标准煤的开采量已达 10 亿余吨,不可能想象光靠煤电能满足能源数倍增长的需求,核能必将成为能源构成中的重要支柱。虽然我国的核能利用目前尚处于起步阶段,但在下世纪初期有可能达到可观的装机容量,那时将积累起相当量的高放射性废液,应及早开展其处置技术的研究。

(2)由于我国铀资源有限,不可能仅依靠燃烧铀-235 的热中子反应堆电站,为使核电成为我国能源构成的支柱,必须把天然铀中 99.3% 的铀-238 设法加以利用,因此应及早考虑我国下世纪核能利用的前期研究,开辟新的途径。

(3)高度重视并跟踪国际核能科技的基础研究发展动向,及早部署既能充分利用铀资源又是放射性“洁净”的核能系统的物理基础和某些技术基础的深入研究,适时开展必要的技术预研,加强与国际核能界的学术交流,为我国下一代核能的发展打下人才、知识及技术的基础和储备。