

放射性洁净核能系统

Radioactive Clean Nuclear Power Apparatus

丁大钊

(中国原子能科学研究院, 中国科学院院士

北京 102413)

一、开发洁净能源势所必然

能源是人类社会发展的基本要素。自工业革命以来,利用化石燃料及化石燃料发电是能源供应的基本形式。当前,在世界范围内,燃煤发电约占50%,而我国可能达80%强。我国的能源供、需矛盾十分严峻。当前我国人均能耗只有世界平均值的1/5。如果要使国民经济在2030年左右提高到中等发达国家水平,则能源供应量需比现在增长10余倍。即使采取有效的节能措施,也要从当前年耗10多亿吨标准煤提高到四五十亿吨标准煤。但煤是含有100多种化学元素的宝贵资源,且煤是全过程污染的能源,燃烧后,小范围的粉尘直接危害公众的健康,大范围的酸雨则破坏生态平衡,由于排放二氧化碳而引起全球性的温室效应,将产生更为深远的不良后果。因此从可持续发展战略的要求出发,必须开发无污染或低污染的洁净能源。

核能发电在世界能源构成中已占仅次于煤电的第二位,而电价低于煤电。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、法等约分别占22%、30%、75%,即使如西班牙这类中等发达国家也约占33%。

核能有裂变能和聚变能两类。1公斤铀的原子核全部裂变所产生的能量相当于2800吨煤的能量,因此它是一种高效的能源。到70年代,核能发电已成为一个重要产业。利用聚变能有可能解决人类长远的能源问题,估计聚变所用的氘及氚的地质储量足够人类应用几百万年。但目前可控聚变反应堆还处于基础研究阶段,离商业利用还有相当长的时间。可以预期,下世纪内人类仍将利用裂变能。当前国际核科技界,尤其是一些核能应用的发达国家,都在探索与研究利用裂变能的新技术。这些研究可归结为“放射性洁净核能系统(RCNPA)”,即利用中能强流加速器驱动的次临界装置以获取核能。

二、利用裂变能的问题

核能是一种高效、经济、相对比较“干净”(废物

总量少)的能源,但核能利用有以下主要问题:

(1)天然铀资源利用度低。目前工业应用的是热中子反应堆电站,它以 ^{235}U 为燃料,而占天然铀中99.275%的 ^{238}U 无法利用。

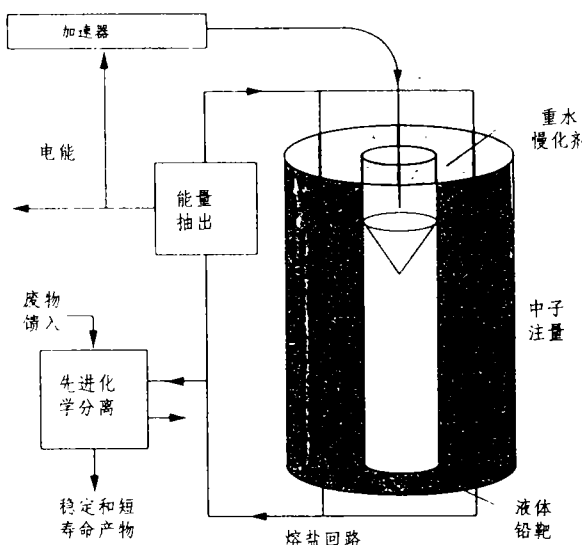


图1 RCNPS 概念图

(2)燃烧后的乏燃料中除 ^{235}U 及 ^{239}Pu 可经后处理回收利用外,剩余的高放射性废液中所含的“少数锕系核素(MA)”及“裂变产物核素(FP)”中有一些半衰期长达 10^5 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,核反应停堆失效、失控是公众最关切的安全敏感问题,因此尚需不断改进其监控技术。

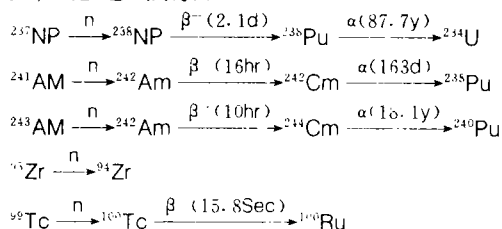
(4)核不扩散要求的约束(指电站反应堆中生成的 ^{239}Pu 的受控)难以完全保障。

这4点尤以前两条更具反应原理上的根本规定性。

为提高资源利用度,目前已建成的快中子增殖反应堆可把 ^{238}U 转换成 ^{239}Pu 核燃料。经二三十年运行后,可以靠 ^{238}U 装料自持运行,使铀资源的利用率提高60~70倍。但它并未解决上述后3个问题。对

高放射性废液的处置方法,目前开发的技术是将其固化,经多层包装后埋入稳定的岩层中。这种后处理—固化—深埋的处理方法虽然已经多年研究及论证,但从几百万年的地质年代长程看,并未解决最终总要泄入生物圈的潜在问题。

利用核反应嬗变(transmutation)核废物中的高放射性核素的概念已经多年的原理探讨,80年代后期核科技界一致认为,通过中子核反应进行嬗变是唯一可行的“洁净”技术路线。谈到利用中子嬗变核素,当然首先想到利用反应堆,在各国各自进行了一系列的原理性研究后,到80年代后期,各种嬗变方案都“殊途同归”于“加速器驱动的嬗变技术”(Accelerator Driven Transmutation Technology)。中子嬗变核素的原理由下列的一些反应式表达,它表示MA及FP核素经吸收中子后变为裂变核素或短寿命(稳定)核素:



由以上反应结果可看出,废物放射性及毒性降低了,嬗变生成的裂变核素还可在次临界装置中再产生裂变,成为附加的能量供应源。

三、放射性洁净核能系统

近年的研究表明,可能构成充分利用铀资源的放射性“洁净”的核能系统,以天然铀作为反应堆的基本装料,并使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)或稳定核素,使系统输出的废料是短寿命、低放射性废物。这一系

统由加速器驱动次临界装置构成。

这一系统的核物理及放射化学的基础在于:中能质子在重核上通过散裂反应可产生数十个中子,这种反应中产生的每个中子平均能耗为迄今所知最少的;利用中子核反应使不可裂变核转化为裂变核,并在系统中形成一个稳定的可裂变核的贮存量;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,在一定的条件下,使MA成为反应堆中附加的能量供应资源,而FP则吸收中子嬗变成为稳定核或短寿命核,这过程称之为分离—嬗变。

依照这一技术路线,近5~10年来,美、日、法等国核科学家及以欧洲原子核研究中心前所长卡·鲁比亚为首的小组分别提出了各自的概念及系统构想。这些构想和计划均由中能强流加速器(1~1.5吉伏、数十毫安或更高流强)与次临界装置(热中子或快中子反应堆)相耦合,结合“原址”的放射分离流程所构成。由图1可见,从加速器引出的中能质子束,在重核上产生散裂反应,为次临界装置的起动提供了所需的“外源”中子。在把非裂变核转变为裂变核的过程中,除倍增中子、输出能量外,同时留一定的中子“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以0.95左右为宜。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。向这个系统输入的是电能及初始核燃料,而输出的则是电能与短寿命、低放射性废物。这就是所谓放射性洁净的概念。加速器所耗电能占此系统所产生电能的一小部分,其余部份可供上网应用。在恰当的设计下,这个系统可运行相当长的时间(5~10年)而不必更换燃料,因此该系统可有高的负荷因子。这将提高系统的经济性。由此可知,放射性洁净核能系统由四部分组成:

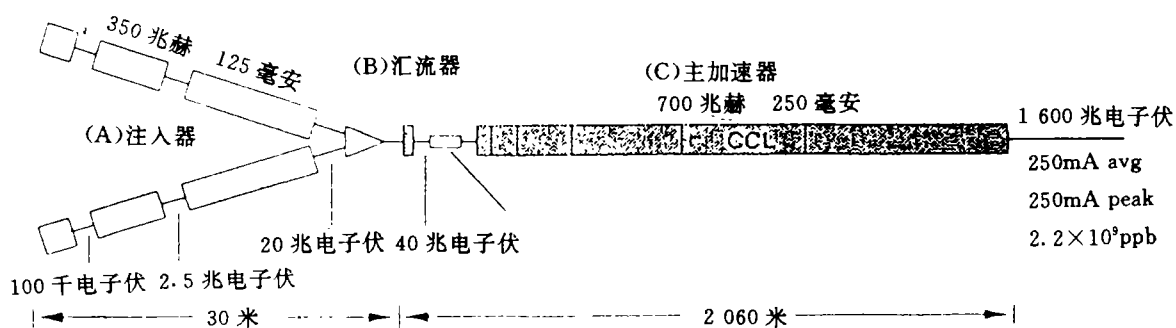


图2 用作驱动器的直线加速器示意图

(1)驱动器:可以是直线型或回旋型的中能强流质子加速器。图2为直线型加速器,图中A为加速器注入部分,由于种种原因(如空间电荷所引起的影响等)限制,在低能情况下对较强的质子束进行加速及传输均有较大困难,故在注入段设计为两

个相同结构的低能加速器,分别把100毫安的质子束加速到20吉伏。B是汇流器,将两束流合并,经主加速器C把200毫安质子束的能量提高到0.8~1.5吉伏。

(2)中子产生器:是一种特定性能、结构及形状

的靶材料。它是驱动器与系统核心(次临界反应堆)的耦合部,即图3的中心部分,它为系统提供外加中子源。靶材料一般选铅、钨、铀等重元素材料。当中能质子束打到重核上时,就会产生中子。材料的结构及形状决定外源中子的产额、能谱、空间分布、感生放射性物质的分布(质量分布和产额)以及束功率的耗散等。

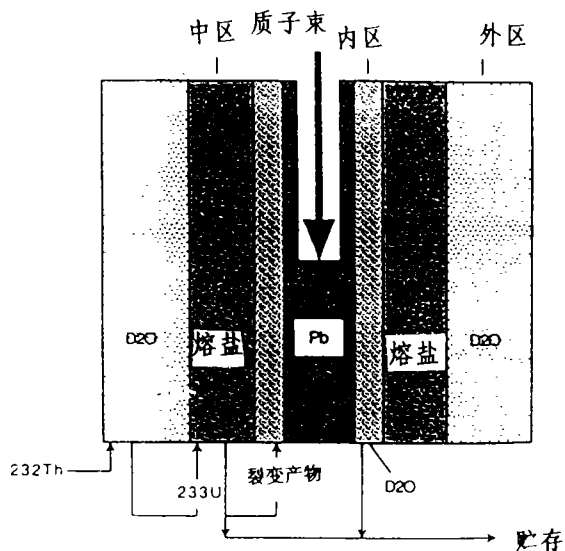


图3 ATW堆构想

(3)次临界反应堆:是系统的“心脏”,见图3的外围部分。外源中子慢化到所需的能量及空间分布后,核燃料的转变、核废物的嬗变、允许燃耗的深度、能量的产生及传输等过程都在其中发生。

(4)“原址”的放化分离设施:根据系统设计的具体结构,在场区处理次临界堆中的放射性废物,

把MA或FP经一定加工后,回送到反应堆中被嬗变。这样尽量减少放射性物质与环境的相互作用。

四、展望

放射性洁净核能系统把本世纪在核科学研究及应用中发展起来的两项基本设备,即加速器与反应堆结合起来,为核能的开发提供了一种新的选择。从原理上可以统一地解决提高铀资源的利用率,为扩大核燃料资源(把 ^{232}Th 转换成 ^{233}U)提供了一种比较简单的途径,并且尽可能地减少放射性废物,提高核装置的安全性及不产生衰变期的敏感核废料。因此,国际核科技界普遍重视放射性洁净核能系统的研究与开发,从90年代初开始组织系列国际会议,国际原子能机构也多次组织专家会议。有关的研究工作,包括加速器、核物理、核化学及反应堆物理等,正逐渐成为核科技界研究的热点与前沿尖端的课题。其中工程要求的加速器综合指标应比目前达到的高数十至上百倍。因此,对整个反应系统的核过程的研究有待深入,从高放射性废液中高效提取MA及FP的工艺流程有待开发,包括各种锕系核素燃烧的反应堆物理与工程也有待发展。

虽然在加速器、放化流程、次临界装置等方面有许多研究与发展工作要做,但它们都可在现已掌握的技术基础上开展,原理上并没有不可克服的根本性障碍。随着研究的深入、原理的验证及示范装置的建设,这种新型的核能装置必将成为世界能源构成的重要支柱。

(责任编辑 肖庆山)

(上接第28页)

(1)决策者承担不了咨询后无改进的结果,承担不了开销咨询费的责任;(2)怕咨询建议与方案的实施影响本公司既定业务,怕推动不了或怕“乱”,怕诊断结果可能危及自己的工作与职位,内部有阻力,怕企业波动;(3)愿意咨询,但费用承担不了,经费无法支出(对此可以采取一些双方可以接受的方案);(4)由于咨询机构或企业不正规,所提供的咨询委托方案水平低,不信任咨询业。还有些客户认为现状不错,不需要、没必要咨询,满足于眼前企业效益好、市场占有率高,往往意识不到企业已潜伏着深层的危机。也有的喜欢对内部管理制度和方法进行修修补补,不喜欢对管理机制进行重新建构,以致使企业管理滞后于市场发展(对这类客户可以等待)。

2. 咨询人才的素质是关键

P.W. 谢伊根据美国咨询公司的经验,将咨询顾问的主要素质要求概括为以下14个方面:

(1)身体健康;(2)通晓职业规则和礼仪;(3)举

止稳重;(4)有自信心;(5)讲求效率,有干劲;(6)正直(赢得信任的品质);(7)独立性(好的咨询顾问一定要有独立工作的能力,不屈从于他人的观点。根据自己的能力和经验,作出自己的判断。同时,他也必须认识到自己的能力、经验和判断力方面的局限性);(8)机智;(9)英明善断(常俱客观的、正确的评价能力);(10)有高度分析和解决疑难问题的能力(对各种复杂情况的基本因素,有分析、整理、归类、权衡和评价的能力);(11)创造性的想象力(富有发现新事物的观察能力);(12)交际本领;(13)进行交流和说服的能力(应超出一般人的平均水平);(14)心理方面成熟(一位成功的咨询顾问,要随时随地准备接触许多具有各自特点的人和事,要准确地观察他们,并以冷静和客观的方式予以积极应对)。

开拓咨询市场还需做好其他方面的工作,比如咨询公司要学会推销自己,要打通与社会各界的关联,还要制定行业法规,建立行业协会等,这里就不讨论了。

(责任编辑 孙立明)