

未来的核能系统：发电并烧掉废物

加速器技术与反应堆相结合有望生产能量并烧掉铀和放射性废物

Viktor
Arkhipov

核能利用的最大难题之一是动力生产过程中产生的高放废物。必须安全而有效地处置高放废物。虽然存在各种技术解决办法,包括深层地质处置库,但放射性废物处置工作的进展却因公众对这项技术的安全性的理解问题而一直受到影响,并在很多情况下被推迟。造成这一结果的主要原因之一是,裂变产生的放射性同位素有很多是长寿命同位素,其半衰期达到十万年至百万年量级。如果有一种能在能量生产过程中烧掉或破坏大多数毒性长寿命放射性废物的方法,则上述的理解问题基本上可以得到解决。

一种新的技术方案,或者说得更确切些是早期思想的切实可行的发展,最近被提出来。根据这一方案,要将加速器与裂变堆技术结合起来构成一个系统。该系统具有利用核裂变有效地发电和/或转变长寿命放射性废物的潜力。在其最简单的形式下,这种加速器驱动的能量生产方案利用高能质子束产生的中子,驱动含有可裂变燃料和放射性废物的转换区组件。转换

区组件像一座反应堆,因为裂变是动力来源。与常规反应堆不同的是,它是次临界的,没有加速器就无法维持链式反应。该系统的燃料可以是铀、钚或钍。

这个加速器驱动系统在破坏高放废物的同时,也将通过生产电这种最便利与通用形式的能源,帮助满足日益增长的能源需求。在今后 20 年内,即便仅仅为满足世界不断增长的人口需要,对各种能源的需求也将增长。联合国估计,到 2025 年世界人口将接近 85 亿。

放射性废物的转变

以环境上安全的方式管理放射性废物,是所有发展核工业的国家正在处理的重要问题。在许多国家,这已成为公众普遍极为关注的严重政治问题。

闭合核燃料循环的概念传统上曾被理解为只使铀和再循环铀发生转变(烧掉),和对少量的锕系元素(镎、镅、锔)进行最终地质处置。但随着时间的推移,出现一种新的认识:减少锕系统元素的量可以降低对放射性废物最终处置库的要求,并使其费用相应减少。

Arkhipov 先生是国际原子能机构核动力与燃料循环处核动力技术开发科顾问。

技术界正在仔细分析,借助裂变过程的少量不多的长寿命放射性锕系元素的中子转变(该过程在产生能量的同时将长寿命放射性锕系元素变为短寿命核素)方案。选定的长寿命裂变产物的中子转变方案,也已被提出。

已提出用核反应的方法转变长寿命核素的几种可行方案。起初,最好的选择似乎是利用核反应堆。然而,近来人们对所谓的加速器驱动系统(ADS)重又感兴趣。这种技术似有良好前景。

人们之所以有这样的兴趣,是因为遇到了如何处理武器库中及商业核运行产生的量更大的并不断增加的乏燃料库存中积累的过剩钚的问题。钚的滥用及这种高毒性物质向环境中的释放,已成为政治上严重担忧的问题。这种钚的多种处置方案正在考虑。方案之一是利用 ADS 技术烧掉钚。ADS 在破坏钚的同时产生大量的电能。这与贮存几千年相比,似乎是解决钚问题的一个更好的办法。

加速器驱动概念的这种能力,还可用于同时燃烧现有商用核动力堆废物中的长寿命裂变产物及锕系元素。燃烧这些裂变产物,是为了破坏那些由于其迁移性将成为处置库放射性剂量的最大贡献者的长寿命同位素,即钨-99、碘-129 和铯-137。虽然上述三种同位素仅约占电力生产时产生的全部裂变产物重量的百分之五,但它们却是与地质处置有关的长期潜在风险的主要贡献者。如果这三种同位素能在内部被破坏,那么,其余短寿命裂变产物和稳定裂变产物废物,就可封闭在专设贮存设施中,甚至封闭在电力生产场址。

为最大限度地燃烧裂变产物,必须就地处理它们。通过优化用于这种燃烧的加速器驱动靶/转换区组件,就可大大减少废物的体积和降低半衰期,从而简化长期贮存与安全处置要求。即使在这个主要功能为燃烧放射性废物的系统中,也可预期到能生产足够的电力,以支付该设施的基建费用和运行费用。

这些目标是值得称赞的,但也应切记,此项技术仍需要进行大量的研究与开发工作。转变的技术可行性,特别是其经济上和放射学上的可靠性都有待证实。因此,无论是支持还是反对放射性废物分离与转变的论点都得经过仔细的比较与评价。

能量生产与转变的结合

加速器用于各种核能应用不是新想法。早在 40 年代末期,回旋加速器发明者 E. Lawrence 就曾提出过这种想法。50 年代,他倡导在利弗莫尔开发材料试验加速器,以产生钚生产所需的强中子通量。为生产重水堆用核燃料,加拿大乔克里弗实验室曾开始对基于加速器的系统进行细致的研究。70 年代末 80 年代初,布鲁克海文国家实验室的科学家们也积极倡导过基于加速器的方案。在最近 5 年里,洛斯阿拉莫斯国家实验室的科学家们一直在根据当今的技术进展和世界能源的前景,重新评价基于加速器的技术。

最近,诺贝尔奖得主、欧洲核研究组织(CERN)前总干事 Carlo Rubbia 已经提出并正在积极倡导基于钚-铀循环的加速器驱动能源生产系统。

有两类加速器可在约 1 GeV 的能量范围和 10—100 mA 的平均电流范围驱动这个系统。第一种方案是采用直线加速器。第二种方案则是采用更为紧凑的环形加速器。上述两种加速器均可提供所要求的能量,但它们均需要进一步的技术开发,以便达到所需的束流强度。回旋加速器由于难以充分约束束流,所以其电流局限于 10—15 mA,而直线加速器预期能产生 100—200 mA 的束流。直线加速器已经以脉冲方式产生这种束流,但要达到产生最高束流所需的近似连续运行,还需进行大量的工程开发工作。一个能提供 15 mA 质子和 800 MeV 的系统,可驱动转换区组

件产生 200 MW 电功率。在这一功率水平上, 环形加速器是一种可能的选择。高束流直线加速器则可驱动能产生 1200 MW 电功率的能量生产系统。在这两种情况下, 均可以预期约 15—20% 的总电功率将用于驱动加速器。

目前, 一些国家和国际组织, 正在研究利用加速器驱动系统进行转变和生产电力的各种技术方案。日本(在 OMEGA 项目——从锕系元素获取额外收益方案——的框架内)、美国(在洛斯阿拉莫斯国家实验室与布鲁克海文国家实验室)、法国(法国原子能委员会)、俄罗斯联邦、欧洲核研究组织、经济合作与发展组织核能机构和欧洲委员会, 正在研究若干 ADS 方案。

ADS 概念可以根据其物理特性及最终目的加以分类。现在所用的分类方法, 基于中子能谱、燃料形式(固态、液态)、燃料循环与冷却剂/慢化剂的类型以及为系统规定的目标。与反应堆一样, ADS 系统可设计成能在两种不同中子谱模式(快中子或热中子)下工作。欧洲核研究组织还试图设计将以可归为“共振中子”的模式利用中子截面共振的系统。快中子与热中子系统都为采用固态燃料和液态燃料做了考虑。甚至已在布鲁克海文开发的颗粒燃料(环球床)概念的基础上, 提出了准液态燃料。

正如前面指出的, 为某种 ADS 规定的目标是使核反应堆乏燃料的现有组份, 主要是钚和少量锕系元素发生转变, 同时生产或不生产能量。其余系统则是为利用钍燃料循环生产能量而设计的。大多数概念基于直线加速器。不过, 欧洲核研究组织研究组和布鲁克海文研究人员提出利用质子回旋加速器。

洛斯阿拉莫斯提出的加速器驱动能量生产系统, 包括一台高能质子束直线加速器, 一个重金属靶(铅或铅-铋)及一个液态燃料系统。液态燃料是很有吸引力的, 因为它可以避免固态燃料的加工过程及

对燃料棒束的管理, 同时允许在运行过程中不断抽取相当份额的裂变产物。这种抽除既改善了燃料的经济性, 又能够破坏裂变产物的长寿命组份。熔盐方案曾被选用, 因为它可在低压条件下运行, 并具有较简单的机械结构、较低的中子吸收损失及较少的液态燃料存量。

欧洲核研究组织的 Carlo Rubbia 及其同事们提议的加速器驱动次临界核系统是一个快中子系统。燃料元件呈固态形式, 有带包壳的燃料细棒。这种系统的标准燃料是钍/铀-233, 但也可用钚(核武器级钚或反应堆级钚)运行。并且它也能使较重的锕系元素镅和锔发生裂变。这种概念的若干非能动性安全设施是基于其物理性质的。

在日本, 日本原子能研究所(JAERI) 20 年来一直从事转变系统设计研究。正在研究的 ADS 概念有两种: 固体靶/堆芯系统和熔盐靶/堆芯系统。加速器推动的熔盐反应堆的概念正在日本的几所大学进行研究。JAERI 即将实施“中子科学项目”, 其目的是在利用中子的基础科学和核技术领域为 21 世纪取得科技革新。有关加速器驱动转变系统的研究及强质子加速器的开发是该项目的重要部分。

在法国的 CEA, 几个不同实验室近几年来一直从事有关 ADS 技术几个方面及其物理的研究工作。1995 年, CEA 决定实施一个有限计划, 其重点是与一般 ADS 有关的大的物项的实验验证。

在俄罗斯联邦, 一些科学中心的若干研究小组一直在从事有关 ADS 系统的技术方面及其物理的工作。正在研究具有不同结构和不同靶材料与转换区材料的各种不同 ADS 概念。一些与分离和转变有关的研究即所谓的转换项目, 得到了国际机构主要在国际科学技术中心框架内提供的财政支持。

NEA 有涉及裂变产物与锕系元素的转变与分离的综合国际工作计划。最近, NEA 核发展委员会建立了一个专家小组,

来进行锕系元素和裂变产物的分离与转变的系统研究工作。NEA 核科学委员会有若干个涵盖不同转变概念的科学与物理方面的合作项目。

欧洲委员会在费用分担的基础上协调各成员国的项目,并在欧洲超铀元素研究所进行有关少量锕系元素、燃料及分离的研究。该研究所从事这方面的研究已有 30 年。为研究含有少量锕系元素的燃料,要进行一系列辐照实验,其中有些实验业已完成。欧洲委员会还通过另一项计划,正在着重研究加速器驱动技术对核裂变安全性的影响。这样做的一个目的是,协调为建立欧洲合作项目的科学与技术基础所做的努力。

IAEA 活动在该领域的作用

IAEA 在该领域内的活动,正在有关能起产生能量和转变这两种作用的新核能系统的计划框架内进行。从事这些活动,是为与核能开发和引入有关的计划、项目及课题(包括 ADS)的技术评价和讨论提供全球论坛。这方面的活动着重于现状报告和技术资料的汇编和传播,及对协调研究的支持。它们包括:

编写并出版 ADS 现状报告。该报告是 1994 年 IAEA 大会期间在维也纳举办的关于“高能加速器在锕系元素转变和动力生产中的应用”专门科学活动技术讨论的一个结果。这份报告面向规划者、决策者及其他对 ADS 开发感兴趣的人员。它概述了正在进行的各种研究活动,正在开发的各种概念及其项目状况,以及一般的发展趋势和有关这种系统用于动力生产、钚燃烧及放射性废物转变潜力的各种评估结果。它包括 6 个国家和两个国际组织的专家提供的论文,以及有关 ADS 技术许多不同领域的论文的正文摘要。

钚基燃料循环现状报告。本报告将更

新近 6 年来已有的资料,并指出需要进一步研究的领域。它还将包括某些特定国家和技术小组提供的论文及其概念主要细节。

协调研究计划。本计划着重于在 ADS 中利用钚基燃料循环来烧掉钚和降低废物的长期毒性。第一阶段涉及 ADS 基准与中子计算,其目的之一是就计算方法及相关的核数据达成共识。

核能生产与转变混合概念可行性和动力技术委员会会议。1997 年 9 月,技术专家们将被召集在一起,以便结合世界核动力现状与今后的可能发展方向,审议和讨论若干种混合概念的优缺点,并在此领域为 IAEA 成员国提供方案和建议。

挑战和机遇

在 ADS 概念的上述可能性能被论证之前,尚有许多技术问题和工程问题有待探讨和回答。未来的工作将需要更多的国际合作,以便共享专门知识和各种资源。

从多方面看,加速器驱动系统值得进一步研究。它们通过发电能为世界日益增长的能源需求作出贡献,通过烧掉钚和高放废物能为环境保护和废物的安全管理作出贡献。一些正在开发的 ADS 类型,能够在安全的次临界转换区组件中由丰富的元素钚生产能量,并产生最少量的核废物流。此外,有望利用这些系统实现燃烧武器级钚并烧掉商用核电站乏燃料(包括其主要的裂变产物)的目标。

目前,世界上若干个国家和地区的科研院所和实验室,正在从事加速器驱动系统的研究与开发工作。在全球一级,IAEA 在此领域的计划正帮助促进有关专门课题的信息交流和合作研究。这种工作表明,人们对作为有助于达到国际能源与环境目标的实际手段的加速器驱动系统技术具有浓厚的兴趣。□