

核燃料技术和性能的更高目标

VLADIMIR ONOUFRIEV 和 PATRICK MENUET

与燃烧化石燃料的电厂相比,核电厂的原始投资费用高,但燃料费用低。例如,一个1000 MW核电厂每年约使用30吨铀,而同等规模的燃煤电厂每年需要约260万吨煤,燃油电厂每年需要约200万吨油。

在今天不断变化的能源市场中,更多的国家正在将竞争引入以前受控制的电力市场。对核电发展来说,这意味着,除其他因素外,为保持竞争性必须使燃料相关费用继续低于燃化石燃料电厂的相应费用。因此,经济压力及环境要求已促使人们在不损害电厂安全水平的前提下努力改进核燃料技术和性能。

为核电厂寻求更好的燃料经济,需要进行广泛而细致的研究,其中包括评价燃料元件的设计及其在各种运行工况下和在不同类型动力堆中的行为、性能和可靠性。人们尤其注意延长核燃料的使用寿命,并且在过去几十年里,在大多数类型反应堆中实现“较高燃耗”水平方面一直保持上升趋势。这已使

所有燃料相关的费用下降,并已减少了必须处理的乏燃料的排放量。同时,高燃耗亦对燃料性能提出更高要求。因此,正在开展旨在评估燃料在不同燃耗设计水平下的行为的研究。只有当向许可证主管部门提供证据证明燃耗的逐步提高能在不损害安全或燃料可靠性的情况下实现时才会被批准。研究着重于一些有可能限制燃料在不同类型运行工况下的寿命的现象。

一段时间以来,IAEA一直在国际水堆燃料性能和技术工作组的框架内,支持该领域内的国家和国际专家的合作努力。另外,它还组织涉及若干从事具体技术问题的国家研究单位的协调研究项目,并开展旨在传播技术和专门知识的技术合作项目。本文概述了一些活动,特别是那些与实现更高核燃料燃耗目标有关的活动。

燃料经验

在运行工况下,核燃料组件受到以应力、热、冷却剂

水化学和辐射的协同效应为特点的侵蚀性环境影响。这些效应导致燃料和控制棒组件的包壳材料及其他结构部件的机械和物理性质逐渐下降。更高的燃料燃耗水平提出对这些材料和部件的更高的物理和机械要求。因此,许多研究和开发工作着眼于先进材料,包括(例如)抗腐蚀性更强的材料的开发。

总的来说,核燃料的可靠性在最近几年一直在稳步提高。就世界在役的主要堆型轻水堆来说,其燃料破损率一直为 10^{-5} ,即每年每100万根在役燃料棒约破损10根。减小和控制燃料缺陷是出于经济和安全上的考虑。“零燃料破损”的目标——实际上意味着将燃料破损率降到 10^{-6} ——已成为若干电力公司和燃料供应商近期要达到的目标。

迄今为止所发现的导致燃料破损的主要原因,主要

Onoufriev先生和Menuet先生是IAEA核燃料循环和废物技术处职员。

与初始设计和制造问题有关。为此,正在开发和实施新的燃料棒和组件设计。例如在轻水堆,已了解到燃料破损的相当大的部分(约为40%到50%)是由机组一回路冷却剂系统里的金属碎屑引起的。因此,一些电力公司已经建立探知及排除碎屑源的计划,燃料供应商正在推出“抗碎屑”燃料的设计。

为了监测更高燃耗下的燃料性能,并为验证预测性计算机程序提供数据,开展了一些被称为辐照后检测的研究。它们既适用于监督型无损检测,又适用于更复杂的有损检测和测量。有关新燃料概念和新包壳材料都需要加以验证。

从经济和安全角度讲,燃料模型制造研究是重要的。为在设计过程中进行安全计算,需要对所有工况下的燃料行为做出可靠预测。为此开发了一些计算机程序。了解正常和异常工况下的燃料行为,便可建立各种运行规则,以防止燃料破损和裂变产品向环境的可能的释放,或在极端情况下,防止严重的燃料和堆芯损坏及由此带来的危害。燃料包壳是这种方法的头道屏障。

即便采用最简单的计算机程序,也能导出能够确保安全运行的运行限值,但条件是要选定保守的限值。模

拟燃料的性能并把这方面的知识纳入程序中也是重要的,因为这样做能就燃料行为做出将有助于提高反应堆运行经济性的更合乎实际的预测。

联合研究

通过 IAEA 工作组,专家们审议了研究结果和运行经验,并一致认为燃料性能可以满足目前水堆的运行要求。但是,鉴于为实现更高的核燃料燃耗而正在进行的努力,还要在几个领域做进一步研究工作。它们包括与下列诸项有关的研究:

水化学控制。水在高温下与结构材料接触时,是一种腐蚀性介质。这意味着燃料组件以及核电机组其他系统的可靠性,取决于冷却系统中流动的水的化学条件。腐蚀是损坏燃料棒的最重要过程之一。80年代,水化学的技术条件逐步变严。这种“越纯越好”的方针曾导致腐蚀状况明显改善,但人们仍然清楚地知道腐蚀程度必须进一步降低。最近,化学家一直是通过往冷却剂中添加化学品的方法来修改技术条件。调查研究还使人们对腐蚀机制有了更好的了解。当今,水化学的管理方法因电厂不同而变得更加不同。例如,电厂操作员虽然有新的

工具(计算代码和程序)使技术条件范围内的水化学参数和管理方法最佳化,但还要考虑电厂的特殊性。这些问题正通过两个 IAEA 协调研究项目加以研究。

运行异常。90年代,已经有几个国家报告了电厂停堆操作期间发生的燃料组件弯曲和控制棒下落问题。尽管这些事例的落棒时间仍在所涉及的反应堆的技术条件的限值内,但这些异常曾被仔细分析和研究。有关这些异常(包括燃料组件间水隙现象)的研究仍在继续。已实施了一些对策以防这些问题再次发生。

辐照效应和其他效应。正在研究一些与更高燃耗下核燃料辐照有关的现象。辐照引起的微观结构改变的详细特征,是了解和预测辐射损伤诱发的物理和机械性能下降的关键。(见第23页图。)某些辐射诱发的现象的基础理论的进展与其他方面的进展一起继续改善着对压力管变形预测的准确性。这方面的知识正在促进更长寿命压力管的开发。

裂变气体形成与燃料辐照时间长短有直接关系。在高燃耗水平下,这些气体能够导致不良后果,包括使燃料棒内部压力增高。通过这种现象的研究,人们正在寻找为改进高燃耗下燃料行为

燃料行为和结构的研究

的预测而需要考虑的因素。正为这项工作做出贡献的是参与 IAEA 燃料模型制造协调研究项目的研究人员。研究了 19 种不同的程序,改进并验证了一些基本模型和程序。

同时,一种更先进的燃料性能模拟程序以及有关这种程序在反应堆运行和安全评估中应用的准则,已传授给了 10 个东欧国家。目前,正在一个 IAEA 技术合作项目框架内改进这种程序使之能用于预测 WWER 型反应堆所用燃料在正常和瞬态工况下的行为。与辐照期间氦的形成有关的燃料结构改变的另一个原因也正在研究中。一些国家将该现象作为安全研究的一部分加以研究。

事故工况下的燃料行为。为增强对不同工况下燃料行为的了解,正在通过一些模拟的事故情景对燃料进行试验。正在研究的两种情景是反应性引入事故和失冷事故。两个情景都涉及在增加的燃耗水平下进行燃料性能的试验。在一些国家实施的这些研究计划的早期结果,已于 1997 年 5 月报告给 IAEA 工作组。这些计划的最终结果,预计将成为未来几年里实现所期望的更高



➡ 边缘层

➡ 正常燃料结构



研究已表明,在高燃耗水平下,燃料结构发生改变,如这两幅电子显微镜高倍放大图所示。有一外围边缘层形成,其特点是含超细晶粒,有 10%—20% 高孔隙度,并且含氦。左边圆圈为正常燃料结构的近视图。

燃料燃耗水平方面的一个决定性因素。

技术挑战

在下一个 10 年,主要受经济刺激的驱使,核燃料向更高燃耗水平发展的趋势预计将继续下去。预计到 2010 年,水堆中燃烧的不同类型燃料的燃耗水平将增长 32% 或更高。这些逐步增高的燃耗水平必须先经试验并被认为是合格后,相应的燃料才可被准许使用。在某些领域,要开展很多的研究与开发工作,因为某些燃料破损的原因即使在检查之后仍不能完全被理解。另外,尽管混合氧化物燃料很少发生破损,但仍需要得到更多实验数据以研究破损混合氧化物

燃料棒,特别是在高燃耗水平和更长辐照时间情况下的行为。

IAEA 水堆燃料性能和技术工作组,包括来自 26 个国家和 3 个国际组织的专家。IAEA 正通过该工作组以及其他途径,集中精力于特定问题和需要,以帮助各国从彼此经验和技術中获益。例如,IAEA 与经济合作与发展组织核能机构一起建立了国际燃料性能实验数据库。这个包括从 300 多个燃料棒实验中获取的数据的数据库正在支持参与国的研究工作。这些和其他行动,正在促进为解决未来的技术难题以及提高核电厂的高效运行所做的集体努力。 □