

重水堆的先进技术和设计

一些国家正致力于重水堆的进一步开发

J. J. Lipsett 和 J. T. Dunn

全世界目前正在运行或正在建造的商用重水堆 (HWR) 共 44 座, 分布在 6 个国家中。多年来, 这些重水堆在年度容量因子和寿期容量因子方面, 一直处于世界领先地位。业已证明, 它们是轻水堆的富有生命力的替代者。

重水堆除了用于基载电厂时可达到较高的容量因子外, 必要时, 它们也能提供极好的负荷跟踪服务。燃料组件和蒸汽发生器一类的关键部件的运行实绩一直极佳。经验表明, 由于重水堆使用天然铀燃料, 它们的燃料费用一直非常低。

HWR 是一种较新的技术, 阿根廷、加拿大、印度和日本等国正在研究先进的 HWR 设计, 积极挖掘这种堆的潜力。

重水堆的基本特性

已开发出的商用 HWR 有两种基本类型。一种类型是由德意志联邦共和国西门子公司 / 电站联盟开发的, 其整个堆芯置于一个压力容器内。另一种类型是坎杜堆 (Candu), 它是在加拿大由加拿大原子能有限公司 (AECL) 与安大略水电公司和加拿大制造业合作开发的。* Candu 堆采用几百根压力管而不是一个压力容器。两种商用 HWR 都使用重水作慢化剂, 并都具有若干种重要的基本特性:

- 中子利用效率极高, 使一次通过式天然铀燃料循环的实际应用成为可能。当然也可选择其他的多种燃料循环方案。

- 不停堆换料方式提供了一些十分重要的好处: 由于免去了定期的换料停堆, 因而容量因子较高; 用

* Candu 是这种反应堆的注册商标名。

Lipsett 先生和 Dunn 先生是位于加拿大乔克河的乔克河核实验室先进 Candu 堆工程的参加者。

目前正在运行或建造的商用重水堆

	机组数	总功率 (MWe)
压力容器式		
阿根廷	2	367—750
压力管式		
阿根廷	1	648
加拿大	22	540—935
印度	12	220—250
巴基斯坦	1	137
大韩民国	1	679
罗马尼亚	5	705
总计	44	25 013

于控制堆内反应性和通量分布的机械设备的需要量减小, 可以不停堆地更换破损的燃料元件; 以及容易进行在役检查。

- 反应性在从冷停堆到满功率的整个运行工况范围内的变化较小。这就降低了控制装置所必需具备的反应性价值, 并使局部的通量分布扰动减至最小, 从而使因燃料瞬时局部过热而发生问题的可能性减至最小。这还为实现反应性的闭环自动控制提供了方便, 从而改善负荷跟踪的灵活性。

HWR 栅胞的几何间距较大, 允许用实物把冷却剂同慢化剂分开。目前正在运行的所有商用重水堆都使用加压重水作为冷却剂。然而, 为了评价使用二氧化碳、轻水和有机液体作冷却剂的可能性, 一些国家已建造了使用此类冷却剂的压力管式重水堆的试验堆和原型堆。最近, 日本宣布有意建造一座以沸腾轻水作为冷却剂的商业规模 (600 MWe) 示范重水堆。

目前, 大多数重水堆利用天然铀作燃料, 其目的常常是为了避免对铀浓缩厂的依赖。但是, 使用稍加浓铀燃料能明显降低燃料循环费用和提高铀的利用

率。从轻水堆(LWR)乏燃料中回收的铀和(或)钍,也能在现有的HWR中有效地加以利用,从而在重水堆和轻水堆之间建立一种协同关系。从长远来看,通过钍的利用可以大大减少对铀的依赖。

设计和发展的目标

下一步的设计和发展计划的使命是,在保持高度核安全性及良好运行实绩的同时,降低发电成本。使公众增强对于先进HWR设计的安全性的信心也是很重要的,因为这是世界上各种堆型都面临的任务。只要证明安全性的改善是以运行经验、成熟技术及明确的研究与发展工作为依据的,上述目标就能实现。

增强安全性。早已证明,重水堆在运行方面是安全的,并且由于吸取了运行经验和发展的成果,运行中电厂的安全性也在不断改善。对于未来的电厂,各国已确定了若干目标,以便保持或改善电厂、工人及公众的安全性,并增强对电厂安全性的信心。

有些国家的计划正在追求的一个目标,是减少运行人员及维修人员所接受的辐射剂量。达到这个目标的办法是,对氙的管理认真地加以最优化,及早检测出泄漏,迅速确定和不停堆移出破损燃料,改善屏蔽和加强冷却剂的净化工作,以及加强对密封材料的管理。有些国家拟定的目标是保持或减少电厂正常运行时的放射性释放量,虽然它早已普遍低于管理部门规定的释放限值的1%。

目前正在研制新型Candu堆控制中心,旨在改善操纵员的功效并减少发生操作差错的可能性。这些新型控制中心是建立在商用Candu堆多年来使用数字计算机控制设备的经验之上的。改进项目将包括应用专家系统和别的计算机辅助技术,以减少操纵员的工作量并提高显示信息的质量。

HWR的许多基本特性使其具有固有安全性。水与燃料之比较大具有特别重要的意义,因为慢化剂加上单独的冷却回路是一个很好的负热源。压力管式HWR中温度较低的慢化剂也为反应性控制装置提供了良好的运行环境,并使应用完全独立的落棒系统和液体毒物注射停堆系统成为可能。这有助于降低堆芯熔化频度。

在慢化剂冷却系统之外增加非能动的冷却手段,被视为今后在改善冷却特性方面必然会采取的一个步骤。确保衰变热非能动地通过安全壳冷却或慢化剂冷却排入环境,必然会大大地减少发生恶性事故的概率,并延长反应堆的宽容期。

降低造价。电厂基建费用是发电成本中影响最大的一个方面。为了有效地降低基建费用,既要降低设备和劳力费用,又要尽量减少建造期间的利息开支。为实现这些目标而正在采用的途径有下面几种:

(1)从根本上改变电厂布局,以利于大幅度缩短工期;(2)开发能在工厂中预制好然后海运或陆运到电厂工地的大型的管道或建筑物模块。这不仅能减少费用,而且能加速进度和改善质量管理;(3)采用能适用于各种不同的厂址和合同安排的标准化电厂设计,以减少费用和缩短工期;(4)增加计算机辅助的设计、制图、文件编制及管理系统并使之一体化,以减少人力的直接费用和提高工作质量。

提高电厂实绩。为保持较高的容量因子,正在对许多设计目标进行讨论。某些新设计的寿期容量因子目标是94%。在下一个十年里,随着更多的反应堆机组达到它们的设计寿期,电力公司将会更多地注意设计寿命及通过部件的更换或大修延长寿期的可能性。因为基建费用高而运行费用低是核电厂的重要特征,所以能够运行得更长的核电厂在经济上更有吸引力。

发展和推广应用的前景

能源预测表明,下个世纪内全世界对电力的需求将稳步增长,这是因为人口增多,都市化加快以及预计人均耗电量会增加,对刚刚开始工业化的那些国家来说尤其如此。电力在家庭及工业应用中是一种方便、干净、安全和高效的能源。核动力能提供可靠而廉价的电力,这不仅能在核技术部门,而且能在竭力降低产品生产成本的其他高技术部门中,提供就业机会。

大中型HWR发电机组。大多数商用HWR的总输出功率在540到935MWe之间。可以预料,这一功率范围的发电机组对于拥有完善的大型电网的国家,和对于那些计划的负荷增长率相对来说较高的国家,仍将是有意义的。

标准化Candu-6(前称Candu-600)单机组电厂的设计,是以加拿大安大略省非常成功的皮克林A电站(4×540MWe)为基础的。目前在役的Candu-6单机组HWR电站有4座(加拿大两座;阿根廷及南朝鲜各一座),另外5座正在罗马尼亚兴建。这9套都是总输出功率为640—680MWe的机组。过去5年内,对Candu-6设计已作了改进,现称之为Candu-6(2型),总输出功率约800MWe。

Candu-6 (2型) 在安全性、可利用率及可运行性方面均有提高。另外, 为降低基建费用和缩减工期, 也已作了许多更改。

位于加拿大安大略省的达林顿核电站 (4×935 MWe, 总功率) 即将竣工。达林顿电站本身说明 Candu 多机组电站在不断改进, 它们是由运行多年的布鲁斯 A 电站 (4×826 MWe, 总功率) 和布鲁斯 B 电站 (4×845 MWe, 总功率) 演变而成的。此项设计的进步主要有: 大型构筑物得到改进, 系统中大部件的数量减少, 部件和系统的可接近性更好, 计算机在电站控制方面的应用有了改进, 以及扩大计算机在安全系统的运行和监测方面的应用。

德意志联邦共和国西门子公司的加压 HWR 系列, 起源于多用途研究堆 MZFR (57 MWe)。采用压力容器的这种 HWR 系列, 在阿根廷的阿图查-1 及正在建造的阿图查-2 (750 MWe HWR) 中得到延续。在降低氙含量、液压驱动控制棒、燃料贮存能力以及替代性燃料循环方式等方面, 已作了改进。

印度的 HWR 计划是以额定功率 235 MWe 的压力管式 HWR 机组为基础的。目前正在开发更新的双机组设计, 每套机组 500 MWe。已经作出安排, 要使 6 套 500 MWe 机组在 1997 年初开始商业运行。这种 500 MWe 设计在电厂布局、安全壳、反应堆系统、燃料装卸和不停堆换料, 以及安全系统等方面都有了改进。在印度的计划中, 一个重要的指导思想, 仍是提高本国在研究和开发、工程、制造、建造及运行等方面的能力。作一些渐进的更改和若干设计特性的标准化, 都是这种思想的反映。

日本正在设计一种能利用钚的改进型热中子反应堆 (ATR), 这是一种重水慢化、沸腾轻水冷却的反应堆。ATR 的设计以普贤堆为基础, 该堆是一座 165 MWe 的原型堆, 自 1979 年起一直在商业运行。普贤堆的运行表明, 混合氧化物 (MOX) 燃料的预期运行性能已成功地得到证实。606 MWe ATR 示范电厂计划的目标是 1997 年商业运行。

小型 HWR 发电机组。功率较小的机组能够适应负荷低速增长和规模较小的电网的要求, 并有助于减轻筹资的压力。这些因素对许多国家来说是有代表性的。

阿根廷一家工程公司与德意志联邦共和国西门子公司合作, 正在开发一种称作阿尔戈斯 (Argos) 的 380 MWe 新型 HWR, 它是西门子公司加压重水堆 (PHWR) 系列的改进型, 含有增强运行的安全性



达林顿核电站鸟瞰。(来源: AECL)

和经济性, 以及减少投资额等许多特点。

在加拿大, AECL 正在开发一种新型 Candu 堆——Candu-3, 输出总功率为 480 MWe。Candu-3 设计的特点是: 安全性加强, 寿期容量因子达到 94%, 建造周期为 30 个月, 以及无论是单机组配置还是多机组配置, 对世界上大多数厂址都适用。目前, AECL 正在同几个加拿大电力公司和一些国家进行讨论, 预计会得到一些结果, 即初步承诺建造一套或多套机组。

在印度, 现有由 4 套 235 MWe 压力管式 HWR 组成的基础, 正在逐步扩充, 目前有 8 套 HWR 正在建造, 另有 4 套机组计划于 1996 年交付后投入商业运行。

HWR 除了生产可靠的廉价电力外, 还有可能用于集中供热和生产适用的工艺用热 (例如, 用于从沥青砂矿中就地提炼石油)。

小结

商用 HWR 作为一种发电系统, 已经取得许多成就。这些成就包括极好的安全记录、较高的年度容量因子和寿期容量因子, 较低的燃料费用以及其他性能方面的许多优势, 这一切表明, 从本质上看, HWR 技术是一种很好的技术。

HWR 有着继续发展的极大潜力, 冷却剂系统和慢化剂系统分开的这种特点, 为改进安全特性提供了条件。一些已知的能力尚未完全开发出来。从新型燃料循环和多种应用方面的灵活性所提供的机会来看, HWR 技术一定会继续使研究、发展及设计的投资得到回报。