

与中国核电事业共同成长

N 核电[®] 5

NUCLEAR POWER 2011

俄罗斯斯摩棱斯克(Smolensk)核电站



核电⁵ NUCLEAR POWER 2011

俄罗斯罗蒙诺索夫(Shalensk)核电站



核电[®] NUCLEAR POWER

—— 1984年创刊·内部资料 免费交流 ——

2011年第5期(总第85期) 2011年10月25日出版

Contents

《核电》编辑委员会

主任:

贺禹

副主任:

张善明 赵华

郑健超 杨忠勤

委员(按姓氏笔画为序):

王晓航 冯毅 田洪宝

刘伟瑞 朱成虎 朱毅明

阮大伟 严锦泉 陈光

陈晓伟 周士荣 周志伟

金军 赵昔 赵锦洋

倪国平 崔绍章 康椰熙

黄潜 程慧平 廖伟明

蔡维慈

主编: 濮继龙

副主编:

邹勇平 戴忠华 黄学清

张一心 刘志铭

编辑部主任: 张锦飞

责任编辑: 毛建新

美术编辑: 张锦飞

核安全 Nuclear Power Safety

敬畏核安全, 加深对核安全问题的全面准确理解……濮继龙 (1)

福岛核事故情况梳理及相关经验教训总结

……林贤军, 郭娟彦, 张华, 丁亮波 (4)

工程管理 Project Management

浅谈总承包模式下的安全监督管理……蒋崇勇 (10)

浅谈核岛主设备锻件监造中的质量控制……刘红伟 (14)

海阳核电厂常规岛设备监造管理特点及体会……李卫华 (18)

核电设计 Nuclear Power Design

三门核电厂 AP1000 特殊监测系统 SMS 简介……余波 (24)

AP1000 保护和安全监测系统 PMS 简介……鲍文军, 彭妮 (27)

AP1000 和 VVER 机组数字棒控系统比较……应超 (32)

核电新技术 Nuclear Power New Technology

先进小型压水堆的特点和优势……陈培培, 周赟 (37)

核电国产化 Nuclear Power Localization

国产核电厂全范围模拟机之测试管理方法探讨

……吴帆, 邹沫元, 郑伟 (44)

先进小型压水堆的特点和优势

The Characteristics and Advantages of Advanced Small Pressurized Water Reactor

陈培培¹, 周 赟²

- (1. 国家核电技术公司, 北京 100029;
2. 贝尔弗科学与国际事务研究中心, 哈佛大学, 波士顿 02138)

摘 要: 国际先进核电国家纷纷将小型反应堆作为今后发展的重点方向之一, 并且已经积极地投入到科研和设计中。先进小型压水堆核电机组主要适合于非主干电网系统, 可以比较经济和高效率地替代中小型火电机组。现有的几种先进小型压水堆设计方案普遍采用模块化和一体化设计, 并大量使用非能动安全系统。这些特点有效地提高了反应堆的安全性和经济性。详细地讨论了先进小型压水堆核电机组的安全性和经济性, 并且将其与同样输出功率的大型压水堆核电机组的安全性和经济性进行了比较。

关键词: 小型反应堆; 先进压水堆; 模块化反应堆

Abstract: Many developed countries with strong nuclear energy technology have realized the importance of Small Modular Reactor (SMR) and initiated R&D programs in SMR. The Advanced Small Pressurized Water Reactor (ASPWR) can be used in remote power grid and replace mid/small size thermal power plants economically and efficiently. The current several ASPWRs commonly adopt modularization and integration design and the passive safety systems, which effectively improves the safety and economy of reactor. This paper discusses in detail the safety and economy of ASPWRs, and makes a comparison with the large PWRs.

Key words: Small reactor; Advanced pressurized water reactor; Modular reactor

0 前言

由于世界经济一体化的不断深入, 发展中国家对能源需求快速增长, 以及各国对环境和气候变化重视程度进一步加强, 未来国际电力市场的需求和结构将面临重大改变。今后几十年, 核电市场的增长将会主要集中在发展中国家。然而, 现有的大型商用核电机组很难适应经济水平低、基础设施和技术能力都相对落后的发展中国家和地区; 相反, 先进小型模块化核电机组却因其在安全性、经济性和灵活性上的特点, 更适合在广大发展中国家推广。

进入 21 世纪后, 以美国为首的先进核电国家纷纷认识到这个趋势, 逐步将小型模块化反应堆作为今后发展的重点方向, 其中某些先进小型压水堆

已经进入工程设计和安全评审等实质开发阶段。本文侧重从安全性和经济性 2 个方面介绍先进小型压水堆核电机组的特点, 分析其在未来能源市场的优势。这些特性使得小型反应堆核电机组尤其适合于主干电网的电力补充以及中小型火电机组的替代。

本文的目的是为国内核电业界提供有关小型模块化反应堆的科技发展信息, 促进我国在先进小型压水堆技术方面的研究, 提高我国核电设计和设备制造的整体能力。

1 国际先进小型压水堆发展的现状

先进小型压水堆概念是在上世纪 80 年代提出、90 年代以来发展起来的。国际原子能机构 (IAEA)

在1985年发布中小型反应堆技术展望报告和经济合作与发展组织(OECD)下属的原子能机构(NEA)在1991年公布的中小型反应堆发展状况报告中都认同中小型核反应堆在安全性、经济性和灵活性上比当时已建的各种第二代大型轻水堆有着明显的优势。之后的20年,以美国为主的西方核能大国在先进小型轻水堆(主要是压水堆)上展开了积极的研究。特别是进入21世纪后,全球经济一体化迅速加快,极大地促进了全球能源市场的整合,小型反应堆在经济性和灵活性方面的优势得到了进一步的体现。美国等核工业发达国家也正因为看到了这个巨大的潜在市场,才在近几年迅速地调整了核能的研究方向,加强了先进小型压水堆的工程实现和市场推进力度。2010-03-23,美国能源部长朱棣文在华尔街日报上发表专文和之后召开小型反应堆发展会议,标志着美国开始调整新一代核反应堆研发的方向,在保留一部分第四代反应堆研发项目的同时,积极开发基于成熟技术的小型模块化压水堆。

2 先进小型压水堆的安全性

先进小型压水堆在安全性上比第三代压水堆(AP1000, EPR等)有了进一步的提高。安全性的增加主要来自2个方面:一是大量采用“设计安全”原则,二是发挥小堆小“源”的固有安全优势。

2.1 设计安全

20世纪80年代,特别是美国三哩岛事故之后,核工业界对轻水反应堆的事故特点和安全特性有了比较完整的认识,特别是对那些威胁堆芯结构和燃料棒完整的事故做了详细的研究。对现有大型轻水堆安全构成最大威胁的事故是由主管道双端断裂造成的主回路失水事故,该事故也是设计基准事故中最复杂的一种事故;其次,主回路小破口事故和相应的长期冷却也是反应堆安全的难点。因此在20世纪80年代以后,研究人员提出了设计安全(Safety by Design)的概念,通过设计的优化从根

本上消除或者尽可能地降低对反应堆安全构成威胁的事故工况。总的来说,在失水事故的应对上,从原来的“失水-注水”的被动策略转向“减小失水”的主动策略。

先进小型压水堆正是在设计安全这种理念下发展起来的。其中最典型的例子就是采用一体化主回路压力容器结构,取消主回路各主管道,从根本上消除了由于一回路主管道断裂造成的大破口失水事故。此外,由于所有主回路部件都在压力容器内,压力容器内的单位功率冷却剂保有量大大高于现有大型压水堆,主回路系统热惯性提高,有效降低了失水事故后堆芯温升速度和堆芯裸露的可能性。

在小破口事故的应对设计上,同样是遵循“减小失水”的原则。首先采用耐压安全壳,增强安全壳压力平衡能力。通过提高破口背压,获得主回路在破口发生后的瞬态保水能力;其次,大量采用非能动安全设计,通过多种自然循环系统,转移堆芯余热。非能动安全系统大大降低事故后对人为干预的要求,可以避免各种因人员操作造成的错误。

由于采用了“设计安全”的各种措施,从根本上降低了发生严重事故的可能性。因此,先进小型压水堆的安全性(表现在堆芯熔化概率和大规模放射性释放概率上)比第三代压水堆有了数量级的提高(见表1)。

2.2 小堆小“源”

反应堆输出功率的减小可以缩小各种“源”项。小“源”既可提高反应堆的固有安全性,又可减少对公众和环境的影响。

第1个小“源”是减小反应堆热源。反应堆功率输出的减小同样导致反应堆在事故中热源的减小。在相同堆功率密度的情况下,反应堆功率输出和堆芯体积成正比, $P \propto L^3$;而反应堆传热能力(传导,对流,辐射)和反应堆的传热面积(堆芯,压力容器,安全壳等)成正比, $A \propto L^2$;因此单位功率的传热面积跟反应堆输出功率成反比, $A/P \propto 1/L = P^{-1/3}$;在事故工况下,单位功率传热面积又可直接

表1 先进小型压水堆安全性能的改进

安全标准	NRC 对现役电厂要求	IAEA 对新电厂要求	第三代压水堆 (AP1000, EPR)	先进小型压水堆 (IRIS ^①)
堆芯熔化概率	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	10^{-8}
大规模放射性释放概率	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	10^{-9}

注: ① IRIS (International Reactor Innovative and Secure) 是由美国 Westinghouse 公司设计, 多国参与的先进压水堆研究项目。它是最早进入全面工程设计和安全评估的先进小型压水堆设计, 之后其他的先进小型压水堆方案大多都参考了 IRIS 设计原则和安全评估方法。

转化为传热效率,即反应堆输出功率越大,单位功率传热面积越小,反应堆应急冷却系统的效率也就越低。在非能动安全系统中,这种关系就更加明显。因此,先进小型压水堆在固有安全上有先天的优势。

第2个小“源”是放射性物质源。核电厂安全的根本目标是减少放射性物质的释放,降低反应堆对公众和工作人员健康的负面影响。反应堆内放射性物质的总量和电厂输出功率基本成正比关系;电厂的输出功率越大,所需中子裂变数量就越多,产生的放射性物质也就越多。随之而来的安全标准,比如电厂屏蔽的要求、厂区和应急计划区的大小都由电厂放射性物质总量决定。因此,小型压水堆比大型压水堆可相应减少电厂对周围环境影响的范围,减小应急计划区面积,提高核电厂的综合安全水平。

第3个小“源”是核电厂建筑源。跟大型压水堆相比,小型堆各种组件小,管道连接少,整体结构紧凑,具有先天的抗震优势。另外,先进小型压水堆大多采用全埋式安全壳,上层建筑矮小,进一步提高了电厂的整体抗撞、抗震性能。

3 先进小型压水堆的经济性

衡量电厂工程经济性的主要分析方法有成本分析和现金流分析。前一个方法侧重于项目的单位成本,常用的指标是隔夜成本(overnight costs)。该指标量化了除融资成本(主要是贷款利息)以外的所有建造成本,反映了工程建造的平均成本,可以用来衡量项目的经济效益。后一个方法侧重于项目的现金流,常用的指标是最大现金流。该指标量化了项目进行过程中的现金流状况,反映了在项目中某一时刻对现金流的最大要求,可以用来衡量项目对融资能力的需求。

3.1 成本分析

在对小型先进压水堆做成本分析之前,有必要

对现有核电厂,特别是第三代压水堆核电机组的成本状况有一了解。

进入21世纪后,发达国家和部分发展中国家开始考虑建造第三代商用压水堆核电机组。由于第三代核电机组相比第二代在设计 and 建造上有很大的变化,所以对其经济性的研究引起了很多学者的关注。麻省理工学院(MIT)2003年发布的《未来核能报告》第1次全面分析了第三代核电机组的经济性,该报告估计第三代压水堆核电机组的单位造价为2000美元/kW(2002年美元价格)。这个数字和后来报道的在浙江三门的首台AP1000核电机组的单位造价非常接近。

但2005年以后,全球原材料及能源价格暴涨,《未来核能报告》里的单位造价估计(报告中很多经济数据来自2002年以前)受到了很多人的质疑。美国的Keystore研究中心在2007年的报告中认为,新一代核电厂的单位造价在2950美元/kW左右(用2007年的美元,对应2002年的美元值,大概在3600~4000美元/kW左右)。这个数字几乎比MIT2003年的单位造价估计翻了一番。2009年,MIT更新了原2003年的报告,大幅提升对新建电厂的单位造价估计,由原来的2000美元/kW提高到4000美元/kW(2007年美元)。这个数字和后来英国的WNA(World Nuclear Association)分析经合组织核电市场后得出的结论类似。

由于正在开发中的先进小型压水堆核电机组(mPower, NuScale和IRIS)都尚未完成主要的工程设计和安全评审,目前很难准确估计其建造的单位造价。在2010年末向美国能源部正式提出小型堆竞标的3家公司中,只有B&W提供了mPower的单位造价在4000~6000美元/kW之间。表2比较了第三代压水堆核电机组和小型先进压水堆核电机组造价的对比。

一般来说,影响核电厂成本的因素主要有:电厂输出功率的规模效应(economy of scale)、设施

表2 第三代压水堆和小型先进压水堆核电机组造价对比

国家	业主	电厂名	设计	功率, MWe	预计完工日期	单位造价, 美元/kW
美国	FPL	Turkey Point 5&6	ESBWR	1 520	2020年	3 530
美国	SCEG	V.C. Summer 2&3	AP1000	1 117	2019年	3 787
美国	Progress Energy	Levy County1&2	AP1000	1 106	2017年	4 206
美国	Southern	Plant Vogtle 2&3	AP1000	1 100	2017年	4 745
芬兰	TVO	Olkiluoto 3	EPR	1 650	2013年	4 000
法国	EDF	Flamanville 3	EPR	1 650	2012年	3 860
美国	TVA	-	mPower	125	2020年	4 000 ~ 6 000

共享效应 (co-sitting effect)、学习效应 (learning effect)、短工期 / 适应需求效应 (timing effect) 和设计优化效应 (design solution effect)。下面逐个分析以上 5 个因素对先进小型压水堆核电机组成本的影响。

3.1.1 电厂输出功率的规模效应

自 19 世纪末 20 世纪初交流电变成普遍接受的供电方式后, 人们开始认识到集中发电和电厂规模效应的优势。一般来说电厂的规模效应取决于统一的配套设施、简化的物流管理和人员的专业化。这些效应在核电厂中也基本成立。从成本分析的角度来说, 电厂输出功率的规模效应可以用以下公式来表达:

$$n = \frac{\partial C / C}{\partial P / P} \quad (1)$$

式中: n ——边界规模效应系数;
 C ——成本, 元;
 P ——电厂输出功率, MWe。

如果边界规模效应系数小于 1 就说明规模效应存在; 边界规模效应系数越接近 0, 说明规模效应越大。上世纪七八十年代核电在西方国家大规模扩张的时期, 很多学者对核电厂规模效应进行了细致的研究。由于数据采集和回归方法的不同, 各个研究得出的边界规模系数的分布很分散, 但总体上还是认为核电厂存在比较明显的规模效应。1988 年美国能源部在这基础上, 进一步分析了核电厂规模效应的组成和来源, 并得出 $n=0.62$ 的平均边界规模效应系数。因此, 公式 (1) 可以改写为:

$$n = \frac{\ln(C/C_0)}{\ln(P/P_0)} \quad (2)$$

如果把输出功率 1200 MWe 的大型核电机组的基准成本和输出功率定为 C_0 和 P_0 , 并代入 $n=0.62$, 可以得到:

$$C_{300} = C_{1200} (P_{300}/P_{1200})^{0.62} = 0.423 \quad (3)$$

所以, 同样 1200 MWe 的输出功率, 4 台 300 MWe 核电机组的成本是 1 台 1200 MWe 成本的 1.7 倍。根据这个数据和方法, 仅考虑电厂的规模效应的话, 那么 4 台 300 MWe 核电机组的成本将比 1 台 1200 MWe 核电机组的成本高 70%。

3.1.2 设施共享效应

设施共享效应主要考虑在同一电厂厂址内多座

小型反应堆因资源共享而降低的成本。由于模块化设计, 小型堆有着比传统电厂更多的安全、非安全设备和辅助设施共享。在人员培训和管理上也大大简化。

3.1.3 学习效应

学习效应表现在建设同型电厂时, 工程人员和供应商会通过前期几个项目的建造而获得经验, 后续电厂在工期和建造成本上因此可以受益。学习效应在早期的研究中已经得到肯定, Mooz 在研究了美国上世纪 70 年代压水反应堆建造周期后认为, 后续电厂因学习效应可减少 5% 左右的成本。小型堆由于在模块化和标准化上比现有电厂做得更彻底, 其学习效应也会更大。

3.1.4 短工期 / 适应需求效应

由于小型化、模块化和简化设计, 先进小型压水堆核电机组的大型锻造部件少, 并且一体化主回路部件的制造和装配都可以在工厂同时完成。这些都大大减少了现场制造装配的需要, 从而极大缩短了建造工期。因此, 相对大型核电机组 4~5 年的建造工期, 先进小型压水堆核电机组的工期一般在 3 年左右。短工期的直接效益就是使得融资成本下降 (利息费用下降)。

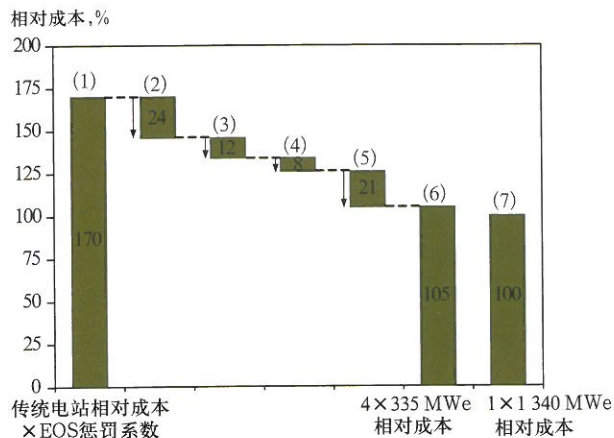
另外, 小型核电机组的建造可以更灵活地适应市场的需求。如果预计的电力需求增长迅速, 可以通过调整多堆开工时间, 压缩整体建设时间, 甚至可以采用并行建设, 在 3 年内达到大型机组 4~5 年后才有的功率输出水平; 如果预计的电力需求增长不稳定, 可以根据实际情况, 调整后续堆的开工时间。并采取边发电边建设的方式, 避免“一窝蜂”式的重复建设, 造成供大于求的局面。这种供给—需求相适应的特点, 提高了投资收益, 降低了融资成本。

3.1.5 设计优化效应

在前面讨论先进小型压水堆安全性的时候已经提到, 小型堆可采用设计安全概念, 通过设计优化来减小发生事故的可能性或降低事故的严重程度。Miller 在研究 IRIS 小型堆经济性时, 着重分析了由于采用一体化结构和非能动安全系统带来的成本节省。跟同样采用非能动安全系统的 AP1000 相比, IRIS 在以下几个方面有进一步降低成本的空间: 简化蒸汽发生器、无一回路主管道、无安注箱、简化安全壳结构和无安全壳氢控系统。

而设计优化效应在 NuScale 的全自然循环系

统上体现得就更加明显。跟 AP1000 相比,该系统没有主泵、一回路主管道、安注箱、堆芯补水箱、余热导出热交换器、安全壳内置换料贮水池等大型设备和装置。它只需使用简化蒸汽发生器和自动降压系统。这些优化设计对成本的影响将非常明显。Carelli 等人根据以上模型,对单台 1 340 MWe 的大型压水堆核电机组和 4 台 335 MWe 先进小型压水堆核电机组进行了综合成本分析。在此模型中采用了 $n=0.62$ 的边界规模效应系数,因此规模效应可以给单台大型压水堆核电机组带来 70% 的成本优势。但小型堆所具有的其他优势即设施共享效应、学习效应、短工期/适应需求效应和设计优化效应等,可以把单台大型压水堆核电机组的成本优势降低到只剩下 5%。图 1 比较了先进小型压水堆和大型第三代压水反应堆核电机组的建造成本,并列出了各种因素在成本分析中的比重。



- 注: (1) 1 台 1 340 MWe 核电机组相对 4 台 335 MWe 核电机组的规模效应 (Economy of Scale, EOS) 效应为 70%。即不考虑任何其他因素, 4 台 335 MWe 核电机组的相对成本为 170%;
- (2) 设施共享效应;
- (3) 学习效应;
- (4) 短工期和适应需求效应;
- (5) 设计简化效应;
- (6) 调整后的 4 台 335 MWe 核电机组相对成本;
- (7) 1 台 1 340 MWe 核电机组相对成本。

图 1 先进小型压水堆和大型压水堆核电机组的建造成本比较

通过以上的成本分析可以看到,虽然大型压水堆核电机组在规模效应上有比较明显的优势,但小型先进压水堆核电机组通过其他多种优化因素,最

终可以把单位成本降低到和大型堆同一个水平上。

3.2 最大现金流分析

在讨论了成本分析之后,决定大型工程经济性的另外一个重要方面是现金流分析。因为在成本分析中采用的隔夜成本不考虑资金的时间价值,并假设工程可以在一夜间就可完成。但实际上,没有一个电厂可以一夜间建成,也很少有这样的工程可以一夜间融资几十亿美元。由于大型核电厂的工期往往在 4~5 年甚至更长,在电厂建成发电之前所有的现金流都是负的,因此项目要在 5 年内承受几十亿美元的负债。这对大部分发展中国家,甚至发达国家的私有电力公司的融资能力都是一个严峻的考验。由于长时间面对如此巨大的债务负担,如果建设进度稍一出现延误,就会产生严重的财务后果。对于经济实力不强的发展中国家,可能直接影响政府收支平衡;对于财力单薄的私有电力公司,这不但可能引发财务危机,甚至导致破产。例如:在上世纪 80 年代,很多美国电力公司因为核电厂项目进展不力而引发财务危机,最终导致被收购或宣布破产;芬兰 TVO 公司因 EPR 工程的 Olkiluoto3 号机组工程延误向 AREVA 提出巨额赔偿;美国 Constellation Energy 公司因无法接受美国政府对其建设 2 个 EPR 反应堆所要求的高额贷款利息,而最终放弃该项目。以上事实说明,核电厂建设项目的融资能力和现金流是决定项目成败的关键因素之一,有的时候甚至可以成为投资核电项目的瓶颈问题之一。

先进小型压水堆核电机组由于输出功率和设计优化等的原因,工期比现有大型压水堆核电机组短 25%~40%;另外由于采用模块化设计、制造和建造,项目的总体灵活性强。如果采用连续建造或者分阶段建造的方式,实现边建造边运行,以“电”养“建”,项目的现金流分布将趋于平缓,大大降低了最大现金流需要。图 2 比较了建设一个输出功率为 1 340 MWe 的大型压水堆核电机组和 4 个 335 MWe 小型压水堆核电机组的现金流分布。对于投资一个同样输出功率的核电厂,小型堆方案所需的最大现金流只有大型堆方案的 50%。

综上所述,相比大型压水堆,先进小型压水堆建设项目在现金流分布上有着比较明显的优势。合理的现金流分布和最大现金流要求缓解了投资方的融资压力,降低了核电厂项目的建造门槛,使得一些不具备大型项目融资能力的国家或公司获得了投

资核电的机会, 有效地扩大了核电市场。

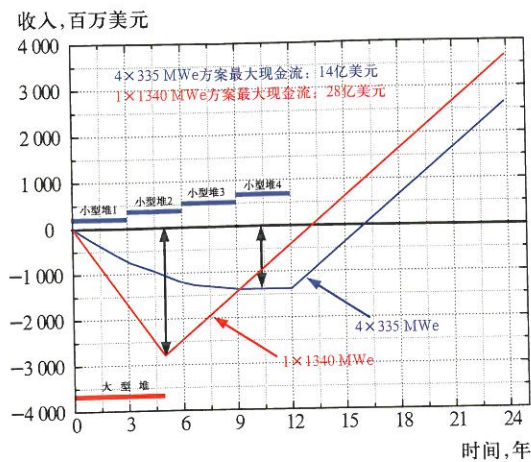


图2 大型和小型压水堆核电机组的现金流分布

4 结束语

目前, 国际先进核电国家纷纷将小型反应堆作为今后发展的重点方向之一, 并且已经积极地投入到科研和设计中。先进小型压水堆核电机组主要面对非主干电网系统, 可以比较经济和高效地替代中小型火电机组。现有的几种先进小型压水堆设计方案普遍采用模块化和一体化设计, 并大量使用非能动安全系统, 这些特点有效地提高了反应堆的安全性和经济性。本文详细地讨论了先进小型压水堆核电机组的安全性和经济性, 并且将其与同样输出功率的大型压水堆核电机组的安全性和经济性进行了比较。由于设计安全和本身的小功率带来的固有安全性使得先进小型压水堆核电机组的整体安全性大大地高于大型压水堆核电机组。虽然经济上的规模效应使得小型压水堆核电机组在单位造价上并不占优势, 但是先进小型压水堆的一些其他经济特性, 例如: 短工期和高学习效应, 足以弥补其在规模效应上的劣势。另外, 与大型反应堆相比, 先进小型压水堆建设具有较小的最大现金流的特点, 这个优势在评估核电项目时可以起到非常关键的作用。虽然先进小型压水堆核电机组在模块化、换料、基准事故设定等技术问题上仍有不小的挑战; 工厂化生产和学习效应所带来的经济优势仍待验证, 但先进小型压水堆核电机组在我国这样一个经济发展迅速, 但地域发展还不够均匀的大国可以起到与大型核电机组互补的功能, 并可在未来的核电设备出口上起到举足轻重的作用。笔者认为先进小型压水堆

的技术和可行性值得我国核能界的重视和研究。

参考文献

- [1] IAEA. Small and Medium Power Reactors: Project Initiation Study Phase I, [R], IAEA-TECDOC-347, 1985.
- [2] Nuclear Energy Agency. Small and Medium Reactors: I, Status and Prospects, [R] 1991.
- [3] IAEA. Innovative small and medium sized reactors: design features, safety approaches and R&D trends, IAEA-TECDOC-1451, [R], Vienna, IAEA, 2005.
- [4] IAEA. Status of innovative small and medium sized reactor designs 2005, IAEA-TECDOC-1485 [R], Vienna, IAEA, 2006.
- [5] IAEA. Status of small reactor designs without on-site refueling, IAEA-TECDOC-1536 [R], Vienna, IAEA, 2007.
- [6] IAEA. "Passive Safety Design Options for SMRs", Nuclear Energy Series Report Final Draft Submitted to the NE DCT on 20 February 2008.
- [7] D.V. Reddya and T.W. Kieransa. Dynamic analysis for design criteria for underground next term nuclear reactor containments, [J], Nuclear Engineering and Design, Volume 38, Issue 2, August 1976, Pages 177-205.
- [8] MIT. The future of nuclear power, [R], Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [9] 张 瑜. 世界首台 AP1000 核电机组在我国问世系体制决定, [N]. 望东方周刊, 2009.3.
- [10] The Keystone Center. Nuclear Power Joint Fact Finding, [R], 2007.7.
- [11] Y. Du and J. Parsons. Update on the cost of nuclear power, [R], Center for energy and environment policy research, Massachusetts Institute of Technology, 2009. 5.
- [12] World Nuclear Association. The Economics of Nuclear Power, [R], 2010. 7.
- [13] M.D. Carelli, B. Petrovic, C.W. Mycoff. Smaller sized reactors can be economically attractive, [C], Proceedings of the International Conference on Advanced Power Plants, ICAPP 2007, Nice.
- [14] M.D. Carelli, P. Garrone, G. Locatelli, M. Mancini, C. Mycoff, P. Trucco, M.E. Ricotti. Economic

- features of integral, modular, small-to-medium size reactors, [J], Progress in Nuclear Energy, pp.403-414, vol.52, 4 (2010).
- [15] W.E. Mooz. A Second Cost Analysis of Light Water Reactor Power Plants [R], The RAND Corporation, 1979.12.
- [16] K. Miller. IRIS economics review. [C], In: ICAPP '05 Proceedings. Seoul, Korea.
- [17] U.S. Department of Energy. Nuclear Energy Cost Database, A Reference Data Base for Nuclear and Coal-fired Power plant Power Generation Cost Analysis, [R], DOE/NE-0095 USA, 1988.
- [18] Half year financial report, [R], AREVA, 2010.6.30.
- [19] The Economist. Constellation's Cancellation, [N], 2010.10.014.
- (收稿日期: 2011-06-17)



伊朗布什尔核电站正式启动

经过数年的拖延后, 伊朗政府于 2011-09-12 在南部港口城市布什尔举办庆祝仪式, 宣布伊朗的首座核电站——布什尔核电站正式启动。伊朗计划今后要陆续修建 10 座核电站, 使总装机容量达到 20 000 MW。而参加庆祝仪式的俄罗斯能源部长什马特科向伊朗媒体表示, 俄罗斯愿意继续与伊朗在核领域进行更多的合作, 并称已经准备好帮助伊朗修建新的核电站。

布什尔核电站设计装机容量为 1 000 MW。20 世纪 70 年代, 伊朗与德国签署合同建造布什尔核电站。1979 年伊朗爆发伊斯兰革命后, 在美国反对下, 德国终止了与伊朗的合作。1995 年, 伊朗与俄罗斯签署了总额 10 亿美元的布什尔轻水反应堆核电站项目合同, 俄方负责向伊朗提供核燃料、设备、技术和人员培训等。由于涉及核能技术等问题, 伊俄核电站合作一直受到西方国家指责, 核电站的建设工程一再拖延。9 月 3 日, 布什尔核电站终于联网发电, 不过当时的功率只有核电站总装机容量的 6%。伊朗政府按照原先的计划, 在 9 月 12 日举行了庆祝仪式, 宣布布什尔核电站正式启动, 核电站的功率也将逐步增加到了总装机容量的 40%。

伊朗原本希望邀请俄罗斯总统梅德韦杰夫或者总理普京出席庆祝仪式, 不过最终出席的只有俄罗斯能源部长什马特科以及俄罗斯原子能公司总经理基里延科。

伊朗原子能组织主席费雷敦·阿巴西·达瓦尼在庆祝仪式上表示, 布什尔核电站的正式启动是伊朗和俄罗斯合作的象征, 显示了两国之间的相互尊重, 并为国家间的原子能合作树立了榜样。伊朗作为一个地震多发的国家, 在日本福岛核电站事故发生后, 其核电站的安全问题也受到了外界的关注。达瓦尼表示, 伊朗科学家从日本福岛核电站事故上吸取了重要的经验。伊朗愿意向波斯湾南部沿海国家承诺, 在核电站启动后, 伊朗将严格执行关于核电站的国际安全标准。

俄罗斯能源部长什马特科也表示, 布什尔核电站在所有阶段执行的都是最严格的安全措施。他还强调说, 俄罗斯将履行合同义务, 给予布什尔核电站一年的质保期。在质保期内核电站设备出现任何问题, 俄罗斯都将免费更换。

什马特科在当天还向伊朗伊斯兰共和国通讯社透露说, 俄罗斯和伊朗在核领域目前还没有签订新的协议。不过伊朗新闻电视台报道说, 什马特科称俄罗斯愿意与伊朗继续加强核领域的合作, 并已经准备好帮助伊朗修建新的核电站。什马特科说, 新核电站项目要等到布什尔核电站满负荷运行后才会进行讨论, 他还同时保证布什尔核电站能够按照原定的时间表, 在大约 2 个月实现满负荷运行。

俄罗斯外交部当天则发表声明说, 布什尔核电站是严格执行核不扩散政策的“示范性项目”。在该核电站的使用过程中, 其所需核燃料和随后产生的核废料将在国际原子能机构的完全监督下由俄罗斯提供及回收。声明说, 布什尔核电站是俄伊两国友好关系和伊朗和平利用核能的标志性事件。它不但将促进俄伊在各个领域进一步发展两国战略协作关系, 而且还将为伊朗在和平利用核能方面赢得国际社会更大信任。

(来源: 国际在线 2011-09-13)