

第 1 期

2012

第5卷 第1期 Vol.5 No.1

ISSN 1674-1617  
CN 11-5660/TL

# 中国核电

CHINA NUCLEAR POWER

ISSN 1674-1617



03>

9 771674 161083

中国核工业集团公司 主管  
中国原子能出版社 主办



# 目次



## ◆ 核电专访

AP1000核电机组本土化研究进展

欧阳予 2

## ◆ 核电研发

宁德核电厂PTR系统设计改进方案

宁元林, 姚士佳, 王中良 5

现场总线技术在核电厂中的应用

王旭, 陈航, 于树新, 等 10

核岛重要厂用水系统停泵水锤计算分析

许拓, 穆祥鹏, 蒋序伦, 等 17

## ◆ 核电建设

核电工程穹顶吊装施工节点提前对后续施工的影响

马新朝, 王玉萍 24

40 t以下起重吊装设备施工管理

霍亚邦, 王玉旭 30

## ◆ 核电运营

影响反应堆压力容器安全运行的根本原因及应对措施

施耀新 40

## ◆ 核电管理

方家山核电工程EPC模式下的测量管理

苗刚锋 46

核电设备质量见证点跟踪管理方法

郝光 50



## 核电设备 ◆

核电设备硼酸注入箱人孔与筒体焊接结构优化

林黎锋 58

## 核电技术 ◆

行车抗龙卷风锁定装置在汽轮机厂房中的应用

程昆明, 郭 静 63

计算机化规程系统在AP1000中的应用

文 芳 68

## 核电安全 ◆

安全壳空气冷却机组电机故障分析

蒋严军 74

凝结水泵电机轴承失效原因分析

程义岩 81

## 青年论坛 ◆

我国发展先进小型轻水反应堆的一些思考

陈培培, 周 赟 88

## 核电资讯 ◆

国内特别报道 94

国外最新消息 96





# 我国发展先进小型轻水反应堆的一些思考

陈培培<sup>1,2</sup>, 周 赟<sup>1,2</sup>

(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, 肯尼迪政府学院, 哈佛大学 02138 美国)

**摘要:** 文章介绍了先进小型轻水堆发展历史和基本特点; 提出了在我国开展先进小型轻水反应堆研究和应用的建议和策略。先进小型压水堆主要面对非主干网电力系统, 可以比较经济和高效地替代中小型火电机组, 因此可以作为节能减排的重要补充手段。先进小型轻水反应堆在安全性和经济性上的特点扩大了核能在新兴工业国家和发展中国家的市场, 可以成为我国核电设备出口的重要组成部分。

**关键词:** 小型堆; 先进反应堆; 轻水反应堆

**中图分类号:** TL42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1617(2012)01-0088-06

## Recommendations for Small Water Reactor Development in China

CHEN Pei-pei<sup>1,2</sup>, ZHOU Yun<sup>1,2</sup>

(1. State Nuclear Power Technology Corporation, Beijing 100029, China;  
2. Belfer Center for Science and International Affairs, John F. Kennedy School of Government, Harvard University, 02138, USA)

**Abstract:** This paper summarizes the history and features of Advanced Small Water Reactor (ASWR), and provides recommendations and strategies on ASWR research and development in China. The ASWR can be used in remote power grid and replaces mid/small size fossil plant economically, and thus can be an important part of energy saving and emission reduction policy. The safety and economy characteristics of ASWR are able to effectively expand nuclear energy market in emerging countries and developing countries. Therefore, ASWR should be considered as a critical part of China's nuclear technology and equipment export strategy.

**Key words:** small reactor; advanced reactor; light water reactor

**CLC number:** TL42 **Article character:** A **Article ID:** 1674-1617(2012)01-0088-06

收稿日期: 2011-05-16

作者简介: 陈培培 (1977—), 男, 浙江余姚人, 博士, 主要从事反应堆热工水力, 两相流等方面工作。

先进小型轻水堆是20世纪80年代提出的,自90年代以来发展起来的一种先进反应堆。它是针对核电厂安全性、经济性和灵活性全面优化的结果。先进小型轻水堆采用更彻底的非能动技术,在应对由极端自然灾害和恐怖主义袭击等造成的全厂断电事故等方面有很大的优势。以先进小型轻水堆为基础的核电厂在非骨干网电力系统、中小型火电机组替代和人口密集地区发展核能具有明显的优势。先进小型轻水堆出色的经济性和灵活性对现有电力供应分布和优化提供了新的解决方案。除此之外,先进小型轻水堆在新型工业国家和发展中国家具有很大的市场。

## 1 当前西方国家核电的发展现状

进入21世纪以来,由于新兴工业国家对电力要求的增长和部分在运行核电站的寿期临近,以欧洲和美国为主的西方核能大国启动了新一轮商用核电技术的应用和研发计划。其主要特征是开始建造第三代商用轻水堆和积极开展第四代核能技术研究计划。AREVA于2005年和2007年开始在芬兰和法国本土建造欧洲先进压水堆(EPR);2007年,美国西屋公司获得在中国建造4座AP1000核电站的合同,并计划于2012年前在美国开始建造该型号核电站;据统计,到2006年底,美国有超过18个电力公司(集团)有意向(或计划)在2020年前投资建造30多个第三代商用反应堆;最雄心勃勃的计划莫过于美国能源部在2002年提出的第四代反应堆研究计划,该项目有多达12个国家和地区参与,预计将在现有商用轻水反应堆大规模退役前(2030年左右),完成第四代反应堆技术的研发和安全评审。

正当几个主要核能大国在技术研发、电站建造等各个方面齐头并进的时候,2008年开始的全球金融危机和随之引发的经济危机给核能产业的复苏带来了乌云。金融危机后的两年中,大部分西方国家和部分新兴工业国家的经济进入了衰退时期。由于连续地刺激经济计划所造成的巨额公共开支,许多政府在未来几年将面临严峻的预算紧张和公共支出减少的困境。而且,由于经济衰退和工业生产的下滑,对能源的需求也随之下

降,许多地方甚至出现了电力供应能力过剩的情况,对增加供电能力的需求开始下降。另外,金融危机后,大部分商业银行普遍提高了控制贷款风险的标准,大型工程项目的融资成本也随之大幅上升。

AREVA在芬兰和法国本土的EPR项目,由于复杂的设计,苛刻的施工条件以及多变的安全审核标准,导致施工进展严重滞后,到2010年底已超出预算50亿美元<sup>[1]</sup>。2010年10月,由于美国Constellation Energy担心节节攀高的成本负担和不确定的安全评审过程,单方面宣布退出与法国电力公司(EDF)的合作,无限期推迟在美国建造2座EPR反应堆的计划。有人甚至估计,到2020年以前,美国将只能完成2座AP1000反应堆的建造计划。第三代反应堆在欧美国家的推进正面临着空前的困境。

第四代反应堆研究计划理论上还在进行,但考虑到美国核管会(US NRC)的审核跨度和周期,现在仍未向美国核管会提交审核申请的第四代反应堆设计,已基本不可能在2020年以前获得批准。因此,第四代反应堆计划的规模已经由原来的6种设计缩减为球床气冷堆、钠冷快堆和熔盐快堆3种堆型。实际上,在2009年以后,美国核管会在第四代反应堆的研究经费中只保留了气冷堆和钠冷快堆这2种设计,其他4种堆型已经被放弃。除此之外,现有球床气堆和钠冷快堆的审核申请并不来自于任何美国公司,而是来自南非和日本<sup>[2]</sup>。可以这么说,美国核工业界已经全面修改了8年前提出的第四代反应堆研究计划框架。

## 2 先进小型反应堆的兴起

核电站输出功率的优化问题在20世纪90年代发展下一代反应堆技术时就已经成为西方核工业界的主要争论话题。以法国(EPR)和日本(APWR、ABWR)为代表的一方,推行大型化设计,通过提高输出功率来获取更大的规模效益,在电站安全性上以增加系统冗余度作为主要方法。这种设计的输出功率大(大于160万kW),但初期投资高,建造周期长,项目风险大;以美国为代表的另一方(AP600、



AP1000)，更重视核电站的经济性和灵活性，提出了以非能动为核心的安全设计原则，通过系统简化来满足经济性和安全性的优化。

2010年3月23日，美国能源部长朱棣文在《华尔街日报》上发表专文，提出美国政府将在未来的10年重点开发小型化模块化核反应堆技术。朱棣文的专文和其后的反应堆发展会议，标志着美国在新一代核反应堆的研发上，摆脱了想“鱼和熊掌”兼得，追求多堆型，高指标的发展方针。全面转向基于成熟技术的小型化模块化设计，搞“小，快，灵”，集中精力，在短时间内完成1~2种成熟堆型，快速进入系统设计，安全评估和工程建造。与8年前提出的，带有预研性质的6种第四代反应堆研究计划不同，这次先进商用小型轻水堆项目有严格的时间规定，并明确把2016年通过NRC安全审核作为关键目标。很明显，这些指标都是为了在2017年左右开始建造示范堆，2020年左右大规模推广小型轻水堆铺平道路。

### 3 先进小型轻水堆的特点和优势

跟第三代轻水反应堆相比，先进小型轻水堆在安全性、经济性和灵活性上有很大的提高。先进小型轻水堆由于大量采用设计安全的概念，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。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”的主动原则。先进小型轻水堆普遍采用一体化主回路压力容器结构，取消了主回路各主管道，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；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，有效地降低了失水事故后堆芯温升程度和堆芯裸露的可能性。在长期冷却策略上，先进小型压水堆全面采用非能动安全系统，而且系统热阱余量很大，可以在全厂断电的情况下独立工作一个星期以上。因此，先进小型轻水堆的安全性比第三代轻水堆（AP1000、EPR等）有了数量级的提高（见表1）。

由于采用设计安全和非能动系统，先进小型轻水堆的结构简单，去除了很多复杂部件。一体化主回路结构和其他多数部件可以在工厂完成制造和组装，直接运抵电站安装，大大降低了费时费力的现场制造和组装的需要。先进小型轻水堆采用模块化设计，工期短，可以根据当地电力需求的增长情况，采用灵活多变的建造方式。以上特点极大地提高了先进小型轻水堆的经济性和灵活性。

### 4 先进小型核电站是我国实现节能减排目标的重要手段

核能作为低排放的绿色能源之一，将成为我国建立低碳发展模式，实现2020年单位国内生产

表1 先进小型轻水堆安全性能的改进

Table 1 The safety improvement of advanced small water reactor

安全标准	NRC对现役电站要求	IAEA对新电站要求	第三代轻水堆 (AP1000, EPR)	先进小型轻水堆 (IRIS)
堆芯熔化概率 (Core Damage Frequency, CDF)	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	约 $10^{-6} \sim 10^{-7}$	约 $10^{-8}$
大规模释放概率 (Large Early Release Frequency, LERF)	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	约 $10^{-7} \sim 10^{-8}$	约 $10^{-9}$



总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%目标的重要手段。预计到2020年,我国的核电总装机容量将有望突破70 GW,一年可以减排二氧化碳6.73亿t,占2020年全国排放总量的7.9%。但从过去几年的节能减排工作发现,很多地区单位GDP能源强度下降趋势出现反复,建立长期稳定的低碳经济仍有很多挑战。其中一个主要方面是有效关停高耗能、低效率的小火电机组。

截至2009年底,我国已关停小火电6 006万kW,超出“十一五”关停目标1 000万kW,关停成效显著。2010年国家能源局把关停目标提高到7 000万kW后发现,进一步的关停工作面临很大困难,不少地区关停压力很大,出现了停而不关,关而不废的情况。全国现有30万kW以下的火电机组约为7 000万kW,占火电总装机的比重仍高达30%以上,其中单机10万kW以下的机组还有1 466万kW。由于其中相当部分处在电网的末端

或者是独立电网,承担着当地的主要供电任务,短期关停的确困难很大。因此,要全面实现2020年碳强度目标仍有很大难度。

现有大型核电站的单机容量大多超过100万kW,总体投资大,工期长,对电力供变系统要求高,不太适合替代电网末端的中小火电站。特别是我国西南地震多发地区,地形复杂,海拔高,远离主电网,从主电网架线电损大,成本高,不适合建大型电站。而先进小型轻水堆却能发挥经济灵活的特点,成为以上地区中小火电机组的最佳替代方案。

另外在东部经济发达地区,人口密度大,能够提供建造大型核电站厂址的选择越来越少,而且普遍面临巨大的土地购置成本。而小型核电站厂址面积小,对应急计划区的面积和要求也要低很多。如果替代小火电站,电厂的原面积和基础设施就可满足新建小型核电站的要求。因此,可





以大大加快关停, 替换高耗能、低效率的小火电站的进程。

## 5 先进小型轻水堆是我国核电出口突破的重要组成部分

今后的10~20年, 我国的核能发展目标不会只停留在国内核电站装机容量的扩大, 更重要的是快速地从核技术/设备进口国向核技术/设备出口国转变。自2004年国家发改委下发《关于组织开展国家重大技术装备研制专项工作的通知》, 把百万千瓦级核电站成套设备列为国家支持的重点专项之后, 国内多家大型设备制造企业先后投入巨资提高核设备的生产能力。经过6年多的发展, 国内核设备产能迅速扩大, 某些设备的生产能力甚至出现了过剩的迹象。虽然在今后几年, 核设备供给的总体形势比较平衡, 但从长远来看, 和其他制造行业一样, 核工业最终还是要通过走出国门, 进入国际市场来维持核能的可持续发展。

在现阶段阻碍我国核电技术和设备出口的主要问题是技术专利和市场定位。由于我国现有掌握的第三代轻水反应堆技术主要从法国和美国进口, 在技术转让协议中都包括了严格的出口限制条款。如果要摆脱出口限制, 就要大规模修改原设计, 这不但需要提高研发投入, 而且增加了通过国内外监管机构安全评估的风险。相反, 先进小型轻水堆的原型是一个国际合作项目, 有大量公开资料, 不牵涉专利问题。通过多年的研究, 其工作原理和一些基本设计原则已经得到比较全面的认识, 不存在技术瓶颈的问题。先进小型轻水堆各种非能动安全系统的论证工作已经很完善, 现有通用安全分析程序完全可以胜任各种事故工况, 这也是为什么美国能源部相信NRC能在3~4年之内完成所有安全审核工作的原因。除此之外, 先进小型轻水堆的所有重要部件都采用成熟技术, 比如IRIS中所有部件都可以在AP1000中找到类似设备。我国在实现AP1000国产化后, 各种制造设备可以直接转化为小型轻水堆设备的生产能力。

从国际现有发电设备市场分布来看, 超过

1/3的发电机组小于500 MW, 将近75%的发电机组小于500 MW (见图1)<sup>[3]</sup>。在发展中国家, 小发电机组的比例将更高。在短期内, 我国在核电技术和设备出口市场定位主要还是集中在发展中国家和新兴工业国家。发展中国家的基础设施和融资能力普遍比较薄弱, 其相应的电网承载能力也比较差, 很难负担大型核电站所需的资金和其他配套设施。而小型模块化核电站由于建造灵活, 对初期投资和其他基础设施要求低, 可以直接进入现有电网系统, 更加符合发展中国家市场的需要。配合一定的贷款扶植, 很多原来无法进入核电市场的中小国家都有可能因此而变成核电设备的潜在用户。

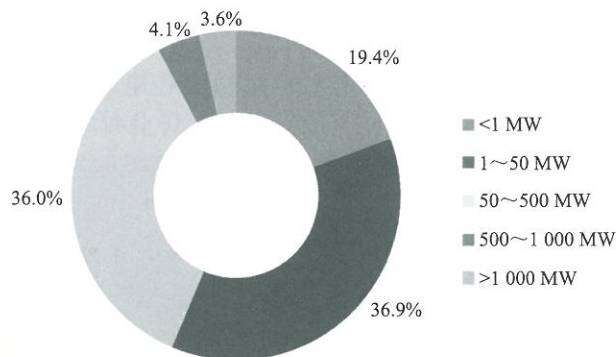


图1 全世界现役电站输出功率分布

Fig. 1 The current power plant distribution (by power level) in the world

## 6 我国开展先进小型轻水堆研究的建议和策略

我国在20世纪80年代后就开展了小型轻水堆的研究, 90年代初清华大学提出的低温供热堆就是一种比较典型的一体化小型轻水堆设计<sup>[4]</sup>。之后, 各高校和研究所围绕着一体化堆的自然循环特性展开了深入的研究, 已经具备了实际应用和工程设计的能力。根据国际上先进小型轻水堆发展状况, 我国应尽快立项先进小型轻水堆工程, 展开设计和论证方面的工作, 争取和国际发展同步, 在5~6年之内完成工程设计和安全评估, 2020年之前示范堆运行。主要建议和策略有以下



几个方面:

(1) 加快吸收AP1000非能动技术和实现有关设备的制造能力

先进小型轻水堆和AP1000在非能动安全原理上有很多共同之处,都是依靠自然循环,重力压头等非能动动力来实现堆芯冷却和余热排放。要通过开发CAP1400和CAP1700的机会,完善安全系统综合测试台架的设计和运行技术,提高安全分析程序的验证水平。同时,要掌握各级安全阀和屏蔽泵的设计和制造能力。

(2) 开展先进小型轻水堆设计和安全论证

根据现有成熟的公开的设计方案,提出我国先进小型轻水堆的初步设计。使用国际通用安全分析程序(RELAP、GOTHIC等),完成初步的安全分析。同时积极展开安全系统综合测试台架的设计和论证工作,配合正在开发中的自主知识产权的安全分析程序,达到反应堆设计和安全程序双论证的目标。

(3) 积极开展国际合作

一旦初步安全分析完成,便可进入试验论证阶段。在安全论证过程中,可以采取多种国际合作的方式。通过合作借鉴别人已有的技术和经验,既可以大大缩短学习周期,加快开发进度;也可以使安全分析透明化,扩大自己的影响力,降低今后在发达国家通过安全审核的风险。

## 7 结束语

在日本福岛核电站事故之后,各国的核监管机构 and 核电技术提供商,将更加重视核电厂应对自然灾害和恐怖主义袭击可能造成的极端事故工况。电站抗震防水能力,非能动安全系统和堆芯长期冷却将成为主要的研究方向。先进小型压水

堆在以上方面有着先天的优势。目前,国际先进核电国家纷纷调整未来发展战略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。其目的是扩大核能在多种领域的应用,并提高在国际核能市场的竞争优势。先进小型压水堆适用非主干网电力系统,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。

本文探讨了在我国今后减排节能中利用小型压水堆替代小火电的可行性,以及小型压水堆在今后国际核电市场中起到的重要角色。由此强调了开展小型压水堆设计研发的必要性及其作为今后核电技术储备的战略地位。亦对我国先进小型轻水堆研发提供了几点建议和策略作为参考。国际先进核电国家在此方面已经积极地投入大量人力和经费,而我国在此领域还处于研发初期。希望我国核电行业决策者和科研人员能够认识到时间的紧迫性,给予其足够的重视。

## 参考文献:

- [1] Half year financial report. AREVA.
- [2] 2010.06.30. <http://www.nrc.gov/reactors/advanced.html>.
- [3] IAEA. Status of small reactor designs without on-site refueling. IAEA-TECDOC-1536 [R], Vienna: IAEA, 2007.
- [4] 王大中,林家桂,马昌文,等. 200 MW核供热站方案设计[J]. 核动力工程, 1993, 14 (4): 289-295. (WANG Da-zhong, LIN Jia-gui, MA Chang-wen, et al. Design of 200 MW District Heating NPP [J]. Nuclear Power Engineering, 1993, 14(4):289-295. )