

世界先进小型压水堆发展状况

陈培培¹, 周 贇²

1. 国家核电技术公司, 北京, 100029; 2. 哈佛大学, 波士顿, 美国, 02138

摘要: 先进小型压水堆是优化核电厂安全性、经济性和灵活性的结果, 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。本文讨论了小型压水堆的概念、优势、发展历史及目前的发展状况, 并重点介绍美国两种主要小型压水堆的设计理念, 意在为国内核能行业人士提供及时的核电科技信息, 并推动我国在先进小型压水堆科研项目上的进一步探讨。

关键词: 小型反应堆; 先进压水堆; 模块化反应堆

中图分类号: TL4 **文献标志码:** A

1 概 述

进入 21 世纪后, 西方及亚洲核电发达国家提出了加快先进小型反应堆研发工作的战略。先进小型反应堆大都采用模块化设计, 与第三代反应堆相比, 具有更高的安全性和灵活性, 对总投资的要求也比较低。这些特性使得小型反应堆尤其适合在主干网电力补充、中小型火电机组替代和海水淡化等方面的应用。

满足国际原子能机构 (IAEA) 定义^[1], 电功率输出小于 300 MW 的先进小型反应堆设计主要有压水堆、气冷堆、钠冷快堆和铅冷快堆。其中发展最快、技术最成熟、影响力最大的是先进小型压水堆。因此, 本文将只讨论小型压水堆的发展和应用状况。

目前以美国、日本和韩国为首的几个主要核工业发达国家都在进行先进小型压水堆的技术研究和工程开发工作。本文将从小型压水堆技术的发展历史和国际核电市场的背景出发, 全面回顾先进小型压水堆在西方国家的发展过程, 并重点介绍正在进行的美国先进小型压水堆发展计划及其几种典型设计。

2 先进小型压水堆的发展背景

核电厂输出功率的优化问题在 20 世纪 90 年代发展第三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 和 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, 在核电厂安全性方面, 以增加系统冗余度为主要方法。这种设计的输出功率大 (1400 MW 以上)、规模经济好, 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 和 AP1000), 更重视核电厂的总体经济性和建造灵活性, 提出了以非能动为核心的安全设计原则, 通过系统简化来达到经济性和安全性的优化。这种设计的总投资少、建造周期短、运行成本低, 但由于受到非能动安全设备的限制, 现有设计的输出功率还没有达到法国、日本大型压水堆的水平, 在规模经济上可能存在一些劣势。

2010 年美国能源部 (DOE) 提出了先进商用小型压水堆 10 年发展计划, 并全面展开与其相关的研发工作。

另一方面, 新兴工业国家和部分发展中国家, 电力需求因为大规模工业化和生活标准的提高而迅速增长。IAEA 在 2007 年的报告中预测, 到 2050 年, 全球 55% 的电力增长需求将来自于发展中国家^[2]。大多数发展中国家普遍面临基础设施差、电网设备落后、资金缺乏、技术力量薄弱等问题。在这些国家建设大型火电站和配套输变电系统将面临很多困难。近十年来, 温室气体排放导致的全球气候变化越来越受到重视, 广大发展中国家在如何平衡经济发展和降低碳排放上面临着巨大的挑战。因此, 模块化小型核电厂的建造灵活、

投资要求低和原料供应链简单的优势就在发展中国家体现得更加明显。IAEA 在 2005 年~2008 年的连续 4 年间发布了一系列的小型反应堆发展报告^[1~4]，努力推动小型反应堆技术的开发和研究，并大力提倡小型核电厂在发展中国家的应用。日本和韩国从 20 世纪 90 年代末就意识到了小型核电厂的潜在国际市场，并积极开展了针对发展中国家需要的小型反应堆研究，以便将来在国际市场上占据优势。

3 先进小型压水堆的发展历史和现状

3.1 诞生阶段——20 世纪 80 年代

美国三里岛核事故之后，美国核管会（NRC）对电厂的设计和运行要求迅速提高。20 世纪 80 年代中期，部分学者在研究三里岛核事故原因和美国核电市场的发展状况后，提出了先进小型压水堆概念。1985 年，前美国橡树岭国家实验室主任 Weinberg 总结了 70 年代末以来美国核电发展停滞和倒退现象，认为其主要原因是建造大型轻水堆所需的巨额资金负担和核电厂工程的不确定性^[6]。Weinberg 认为大型轻水反应堆过于复杂和难于控制，在公众对核电厂安全标准不断上升的情况下，很难兼顾安全性和经济性。他同时提出，下一代商用反应堆应该向小型化、模块化方向发展。同年，IAEA 启动了先进中小型反应堆研究项目^[7]；1991 年，经济合作与发展组织下的原子能机构发布了第一份有关小型反应堆的研究报告，总结了西方各国 80 年代在先进小型反应堆方面取得的进展^[8]。其中最引人瞩目的设计是由美国燃烧工程公司（Combustion Engineering, CE）提出的安全一体化压水堆（SIR）^[9]。这种新型压水堆概念采用一体化设计，即把主回路的所有部件，包括堆芯、稳压器、主泵和蒸汽发生器都放在一个大的压力容器里，从根本上消除发生主管道大破口事故的可能性，极大地降低堆芯熔毁概率，提高了系统安全性能。

3.2 发展阶段——20 世纪 90 年代

由于先进小型压水堆在安全性和灵活性上的优势，进入 90 年代后，有多个国家和国际组织开展了小型压水堆的研发。这些先进小型压水堆的一般特征是：①电功率输出在 300 MW 以下；②主回路一体化结构；③大量采用非能动安全设计；④大部分主回路部件能在工厂同时完成制造

和安装，无特殊运输要求。

DOE 在 2001 年向美国国会提交了小型模块化反应堆（SMR）报告，总结了 90 年代以来各国发展小型模块化反应堆的状况，阐述了这种新型反应堆在安全审核与监管上可能带来的问题和挑战^[10]。除此之外，该报告还提交了一份对边远地区（夏威夷和阿拉斯加）建造小型核电厂的可行性分析，比较了小型核电厂千瓦时输出成本和当地其他电力提供方式的市场价格，结论认为 50 MW 级小型核电厂在以上地区有一定的竞争力，建议国会继续保持对先进小型反应堆，特别是对小型压水堆研究项目的支持。

3.3 成熟阶段——21 世纪

进入 21 世纪后，美国凭借在 AP600 和 AP1000 研发和安全评审过程中积累的经验，特别是针对 AP600 的一系列综合测试结果和分析，对非能动安全系统的瞬态特性和设计原则有了很深刻的认识。多种先进小型压水堆方案开始从概念阶段走向全面工程设计和安全评估阶段。表 1 列出了 DOE 支持的国际革新安全反应堆（IRIS）项目和 2011 年竞标 DOE 先进小型压水堆计划的两种设计和一些技术指标。这 3 种先进小型压水堆都采用了一体化压水堆方案，模块化设计，单堆热输出功率 135~1000 MW。

表 1 美国部分先进小型压水堆设计参数
Table 1 Design Parameters of Various Advanced Small PWRs

设计名称	IRIS	SMR	NuScale
开发单位	西屋	西屋	NuScale
种类	压水堆	压水堆	压水堆
主回路循环方式	主泵循环	主泵循环	自然循环
主回路结构	一体式	一体式	一体式
热工率输出/MW	1000	200	135
压力容器直径/m	6.2	3.5	2.7
压力容器高度/m	22.2	24.7	13.7
燃料	UO ₂ /MOX	UO ₂ /MOX	UO ₂ /MOX
富集度/%	<5	<5	<5
换料周期/a	3.5~7	2~2.5	2~2.5

3.3.1 IRIS IRIS 项目从 1999 年开始，是由美国西屋公司设计，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。IRIS 的一些设计方案基本成为了现有先进小型压水堆的设计标准。

IRIS 的主要设计理念是：在反应堆运行上采用现有成熟技术（普通 5% UO_2 燃料、标准 17×17 燃料组件、传统控制棒驱动机构等），在安全设计上大量采用非能动设计。IRIS 大规模使用了“设计安全”的概念，通过设计优化从根本上消除或尽可能降低对反应堆安全构成威胁的事故工况。

由于使用了主回路一体化设计，排除了设计基准事件中最严重的大破口事故。在小破口事故的应对策略上，AP600 和 AP1000 主要依靠自动卸压系统（ADS）泄压和 DVI 注水，通过传质交换达到堆芯冷却。这种“失水-注水”的策略与第二代压水堆没有本质区别，只不过在“注水”上采用了非能动原理；而 IRIS 抛弃了“失水-注水”的被动策略，采用了“减小失水”的设计安全原则。IRIS 依靠加大压力容器储水量和使用蒸汽发生器参与自然循环来减少主回路冷却剂损失以防止堆芯裸露。

在安全壳冷却上，IRIS 采用了多种方式实现安全壳压力控制和最终热阱。IRIS 采用了类似沸水堆的紧凑型压力壳和安全壳自动泄压系统（PPS）。IRIS 的球状压力壳的耐压能力是大型压水堆干式压力壳的 3 倍以上，而 PPS 可以在破口事故初期大大降低安全壳的峰值压力。由于蒸汽发生器是非能动堆芯冷却系统的一部分，蒸汽发生器热阱——换料水箱布置在安全壳外，因此在长期冷却的过程中可以通过蒸汽发生器把安全壳内能量有效地传到壳外热阱。

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（EPZ）的大小都由放射性物质总量决定。IRIS 较小的输出功率和所采用的“设计安全”大大降低了堆芯融毁几率和放射性物质释放几率，因此 IRIS 可以有效地减少电厂对周围环境的影响，减小 EPZ，提高核电厂综合安全水平。跟大型压水反应堆相比，IRIS 组件小、管道少、整体结构紧凑，具有先天的抗震优势。而且 IRIS 采用了半埋式安全壳，上层建筑矮小，

进一步提高了电厂的整体抗撞和抗震性能。

3.3.2 NuScale NuScale 是由原美国俄勒冈州立大学 Reyes 等人在进行 DOE 多用途小型压水堆（MASLWR）研究项目中提出的一种新型模块化压水堆^[11]。该项目 2007 年结束后，研究人员获得了风险投资基金的支持，成立了 NuScale 公司，继续完成其工程设计和安全分析。

NuScale 最大的特点是全自然循环运行和深度模块化。该设计保留了 IRIS 一体化主回路，耐压安全壳和自然循环冷却等特征。NuScale 没有主泵，完全依靠堆芯-蒸汽发生器温度差形成的自然循环作为一回路冷却剂驱动方式。另外，NuScale 的整个耐压金属安全壳都浸没在水中。在发生破口事故时，这些水既可冷却安全壳，又可通过蒸汽发生器作为反应堆热阱。NuScale 最大的革新在于把非能动原理的应用从反应堆安全系统推广到反应堆运行系统，简化了主回路和反应堆应急冷却系统，降低了单堆建造成本。

除此之外，NuScale 的厂房采用了深度模块化设计，每个电厂可容纳 6~12 个单堆，很多设备可以在 6 机组或 12 机组中共享。由于压力容器外径只有 2.7 m，长度 13.7 m，整个压力容器和堆内组件（包括蒸汽发生器、稳压器、堆芯构件和控制棒机构）都可以在工厂完成制造和组装，并通过灵活的交通方式（海运、河运、一般民用公路和铁路）运到电厂，进行下一步的安装和调试。这种深度模块化设计可以大大减少新机组在电厂的安装和调试时间，缩短了电厂建造工期；另一方面，电厂可根据实际需要逐步增加机组数量，甚至可以做到“安装、运行、发电”同步进行。这种模块化建造和运行方式有效地增加电厂规划的灵活性，提高资金的使用效率。

4 结束语

先进小型压水堆是优化核电厂安全性、经济性和灵活性的结果，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。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。先进小型压水堆突出的灵活性既可作为现有核电大国电厂分布和更新的有力补充，又对今后以发展中国家为主的国际核能市场提供了新的解

决方案。本文讨论了小型压水堆的概念、优势、发展历史及目前状况，重点介绍了目前美国两种主要小型压水堆的设计理念，意在为国内核能行业人士提供及时的核电科技信息，并推动我国在先进小型压水堆科研项目上的进一步探讨。

参考文献：

- [1] IAEA-TECDOC-1451. Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches and R&D trends [R]. Vienna, 2005.
- [2] IAEA. Status of Small Reactor Designs without on-Site Refueling[R]. IAEA-TECDOC-1536. Vienna, IAEA, 2007.
- [3] Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005[R], IAEA-TECDOC-1485. Vienna, 2006.
- [4] IAEA. Passive Safety Design Options for SMRs[R]. Nuclear Energy Series Report-Final Draft Submitted to the NE DCT on 20 February, 2008.
- [5] Kim S H. A Preliminary Economic Feasibility Assessment of Nuclear Desalination in Madura Island[J]. Int. Journal of Nuclear Desalination, 2005, 1(4): 466-476.
- [6] Weinberg A M. The Second Nuclear Era [M]. Praeger Publisher, 1985.
- [7] IAEA. Small and Medium Power Reactors: Project Initiation Study Phase I[R]. TECDOC-347, International Atomic Energy Agency, 1985.
- [8] Small and Medium Reactors: I. Status and Prospects[R]. Nuclear Energy Agency. 1991.
- [9] Hayns M. The SIR Project[M]. Atom, 1989.
- [10] Office of Nuclear Energy, Science and Technology. Report to Congress on Small Modular Reactors[R]. U.S. Department of Energy, 2001. 5
- [11] Reyes J N. Testing of the Multi-Application Small Light Water Reactor (MASLWR) Passive Safety Systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237: 1999-2005.

Status of Advanced Small Pressurized Water Reactors

CHEN Pei-pei¹, ZHOU Yun²

1. State Nuclear Power Technology Corporation, Beijing, 100029, China; 2. Harvard University, Boston, MA, 02138, USA

Abstract: In order to expand the nuclear power in energy and desalination, increase competitiveness in global nuclear power market, many developed countries with strong nuclear energy technology have realized the importance of Small Modular Reactor (SMR) and initiated heavy R&D programs in SMR. The Advanced Small Pressurized Water Reactor (ASPWR) is characterized by great advantages in safety and economy and can be used in remote power grid and replace mid/small size fossil plant economically. This paper reviews the history and current status of SMR and ASPWR, and also discusses the design concept, safety features and other advantages of ASPWR. The purpose of this paper is to provide an overall review of ASPWR technology in western countries, and to promote the R&D in ASPWR in China.

Key words: Small reactors, Advanced pressurized water reactors, Modular reactors

作者简介：

陈培培（1977—），男。2007年毕业于美国伊利诺伊大学核工程专业，获博士学位。现主要从事反应堆热工、两相流以及核能源安全与政策的研究工作。

周 贇（1976—），女，研究员。2006年毕业于美国加州大学伯克利分校核工程专业，获博士学位。现主要从事核能经济、核安全法规与政策、核燃料循环以及核保护的工作。

（责任编辑：刘 君）