

# 美国先进轻水堆的发展

## 正在研究若干设计概念

J. J. Taylor, K. E. Stahlkopf 和 J. C. DeVine, Jr.

1983年, 电力研究所 (EPRI) 开辟了一项富有进取精神的计划, 目的是要研制供美国电力公司电网使用的下一代轻水堆 (LWR)。\* 该项计划是应 EPRI 的电力公司咨询组织的要求而开辟的。这个组织对下面这一点一直十分担心: 如若不执行一项开发性计划, 电力工业界就不可能得到经过改进和有生命力的先进 LWR 设计, 而这种设计对满足 90 年代后期电力公司负荷的预期增长来说是必需的。当时, 这项计划的开辟是以下面两个重要因素为基础的:

- 强有力的电力公司指导委员会得到了发展, 因而能够指导该计划的各种工作, 并保证电力公司在该国正在运行的 110 套商用核发电机组上获得的经验能有效地反馈到下一代设计中。

- 与核管理委员会 (NRC) 早已建立了密切的工作关系, 这保证了根据先进轻水堆 (ALWR) 计划开发的设计, 不仅能满足电力公司的运行需要, 而且也能满足 NRC 的管理要求, 从而有助于确保最终产品顺利而迅速地领到许可证。

自从电力公司诸位 ALWR 创始人提出上述要求以来, ALWR 计划已经生根, 并已发展到相当高级的阶段, 成为 LWR 技术正在出现的新方向中的一个重要方面。他们早期对下一代 LWR 的幻想已经具体地化作工厂的设计概念, 其特点是:

- 同目前的核反应堆相比, 已经大大简化;

- 坚固而宽容, 有很大的设计裕量;
- 完全依靠成熟技术; 从吸收了已有电厂的最好经验的意义上来说是“先进的”;
- 明显地将重点放在人-机衔接上, 充分考虑操纵员的需要, 因为保证反应堆的安全高效运行全靠他们。

### “渐进型机组”

为了实施这些原则, ALWR 计划小组承担了编写“电力公司要求文件”的任务, 即编写关于 ALWR “渐进型机组”的运行性能和设计要求的全面说明。\* 设想这种渐进型机组为功率约 1200 兆瓦电 (MWe) 的大型反应堆; 在机组安全系统和仪器仪表与控制系统方面有极大的简化和改进。这是当前的 ALWR 的直系后代, 其安全系统和管理基础基本上遵循常规的做法。作为这份要求文件编写工作的一部分, ALWR 小组与 NRC 紧密合作, 确定并解决了反应堆安全方面的一批重大但长期未解决的问题, 并将这些解决办法编入这份 ALWR 要求文件。

编写要求文件的工作仍在继续进行, 其最终目标是编写出一份能反映未来电力公司用户的共同意见和经 NRC 安全评价报告处认可的完整而全面的文件。该文件共分 13 章, 其中 12 章已编写好, 并已提供美国用户和世界各地用户参考, 对本世纪末可能建成的反应堆的设计, 正在产生影响。

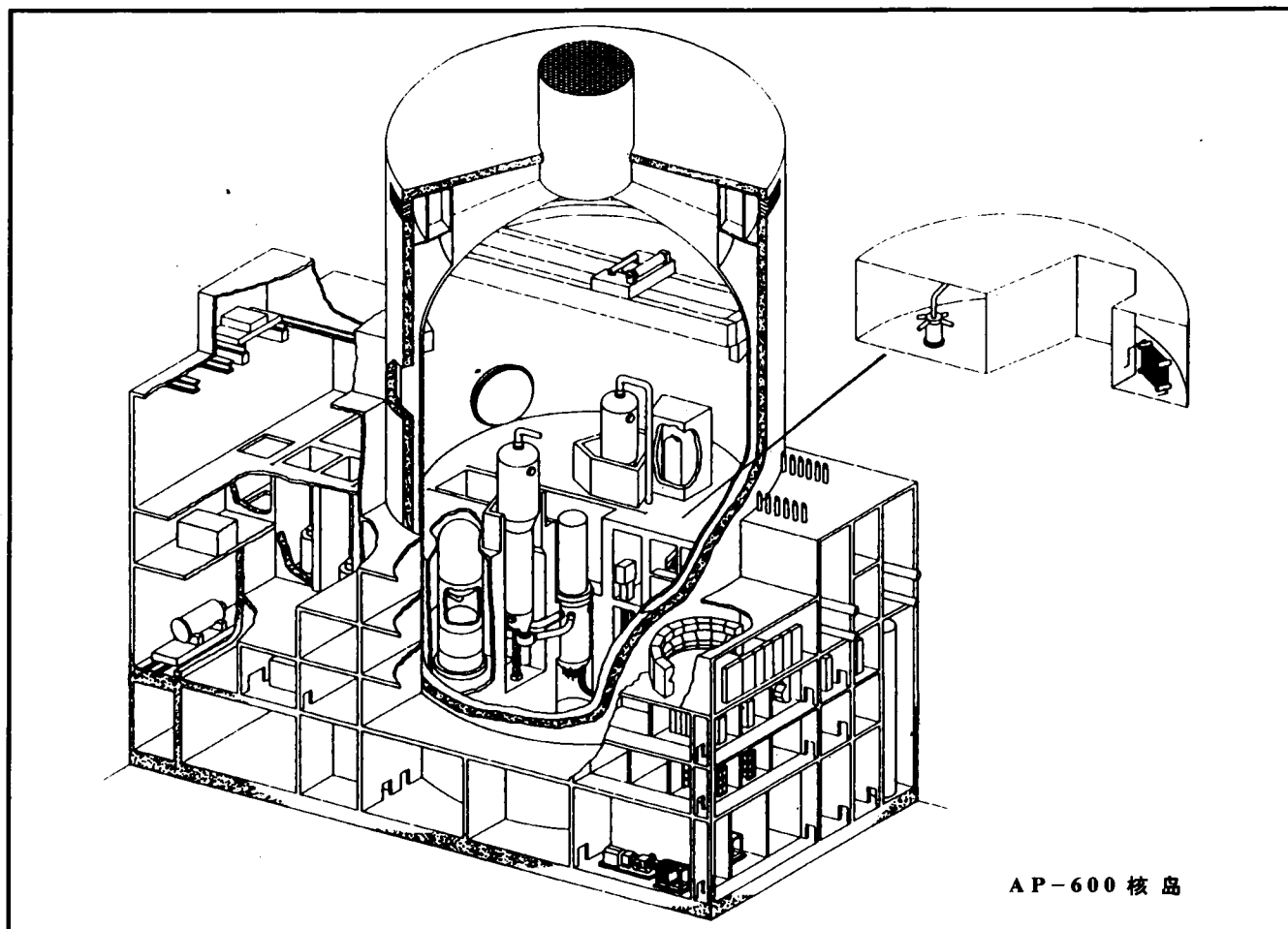
---

Taylor 先生是设在美国加利福尼亚州帕洛阿尔托的电力研究所 (EPRI) 的核动力部副主任; Stahlkopf 先生是该部材料和系统开发处主任, DeVine 先生是该部的高级项目经理。

\* “Next Generation Light Water Reactor” by Stahlkopf, K. E., Noble, D. M., and Taylor, J. J., *Proceedings of the American Power Conference*, Volume 48, Illinois Institute of Technology (1986).

---

\* “US ALWR Program Set Out Utility Requirements for the Future”, by Stahlkopf, K. E., DeVine, J. C., and Sugnet, W. R., *Nuclear Engineering International* (November 1988), and “Light Water Cooled Reactors—Expected Developments”, by Culler, F. L., Stahlkopf, K. E., and Braun, C., *Revue Roumaine de Physique* (April 1988).



AP-600 核岛

这份 ALWR 要求文件全部是安全性和可靠性方面的设计改进意见, 包括: (1) 增加热裕量; (2) 强化反应性方面的要求, 即整个燃料循环周期内温度系数均为负值; (3) 降低反应堆冷却剂的最高温度; (4) 提高反应堆容器的抗脆性; (5) 用环形锻件制造反应堆容器, 这样就不会有垂直的焊缝; (6) 备用的厂内交流电源; (7) 靠自然循环导出衰变热; (8) 配备压力更高的衰变热导出系统; (9) 增加冷却剂装料量; (10) 使用更大更坚固的安全壳; (11) 将安全系统的功能同正常运行系统的功能分开; (12) 大大改善人-机衔接; 也就是控制室要更加易于安全操作。

ALWR 计划除迄今取得的技术进展外, 还已成为美国和国际上各电力公司在指导其未来核反应堆设计方面进行合作的焦点和催化剂。作为 EPRI/美国电力公司的初期计划, ALWR 的工作从早期起就获得了美国参加者的注意和重视, 并已吸引了一些亚洲和欧洲电力公司参加者提供财政和技术支助。目前 ALWR 计划的积极合作者和参加者有: 关西电力公

司 (日本), 台湾电力公司 (中国台湾省), 韩国电力公司 (大韩民国), 法国电力公司 (法国), 国家电力公司 (意大利) 和 KEMA (荷兰)。美国和国际间这种不断加强的协作的协同效应一直非常显著。随着国际合作者参加该计划, 它的技术力量和可信赖性一直在增强; 这样, 该计划的技术产品能向美国和国际的核蒸汽供应系统供应商施加的影响, 也一直在增加, 而这反过来又促进了美国和国际给予更多的支助。

### “非能动机组”

随着拟定渐进型机组要求这一工作的向前推进, ALWR 计划的这个小组还开始探讨一种新的 LWR 概念, 他们称它为“非能动机组”。\* 设想这种非能

\* “The US Advanced Light Water Reactor Program — A Case for Simple Passive Safety Systems”, by Taylor, J. J. and Stahlkopf, K. E., *Proceedings, International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (May 1988)

动机组为一种功率较小的反应堆，这种反应堆的主要安全功能将基本上依靠非能动手段——重力、自然循环和贮存的能量。

当时认为，这种非能动 ALWR 设计概念可能对电力公司的投资者具有吸引力，其理由如下：

- 由于非能动安全概念的固有简单性，它也许能为实现较大的简化提供可能性（其形式是减少许多阀门、泵、槽、仪表等），从而降低建造费用和加快施工进度，提高电厂的可运行性及可维修性。

- 由于消除了对能动部件和人为干预的依赖，非能动机组可以适应多种干扰工况和机组内外的威胁，如失去所有电源。

非能动机组的研究者选择 600 MWe 为标准容量。从理论上来说，非能动机组可以是任何容量的，但由于涉及到尺寸比较大的一些部件（如反应堆容器，冷却水槽），额定功率显著大于 600 MWe 时很可能被证明是不实际和成本效益不高的。再者，规模较小的机组也许能证明有一个特别的长处，即 500—600 MWe 的机组可以更容易适应多数美国电力公司的装机容量规划方案。此外，规模较小的机组为缩短建造周期、设备更多地模块化、学习曲线的重复，以及改善能提高机组总体经济性的其他因素提供了可能性。

ALWR 非能动机组工作的第一阶段是设计竞赛，从中挑选出了两种有希望的 600 MWe 非能动概念设计——一种压水堆（PWR）和一种沸水堆（BWR）——供进一步开发之用。这两种概念均采用非能动安全系统，因此与现有机组相比有了根本性的进步。其中最重要的进步是下面这条设计准则：在发生设计基准事故后 3 天内，操纵员无需采取任何保护电厂或公众的行动。

ALWR 非能动机组开发工作的第二阶段是在美国能源部（DOE）的合作下进行的，内容包括通过广泛的技术研究和设备与系统的研制活动，扩展这些概念的细节。

这些非能动机组的设计尽管仍然处于工程的初级阶段，但已为未来的成功开辟了光辉的前景。下面简单地介绍一下 PWR 和 BWR 的设计概念：

**PWR 设计概念。**非能动 PWR 概念（起名为 AP-600）正由一个设计队在拟订，这个设计队以西屋电气公司为首，由阿冯代尔工业公司、本斯·罗公司等协助。\* 这种 600 MWe PWR 的特点是反应堆冷却剂系统的布置有了改进，把带有密封电机的

AP-600 和标准双环压水堆大宗器材的数量比较

大宗器材	减少
阀门	60 %
大型泵	50 %
管道	60 %
热交换器	50 %
加热、通风和冷却用管道	35 %
抗震建筑物容积	60 %
控制用电缆	80 %

反应堆冷却剂泵直接接在蒸汽发生器出口处。（见第 14 页附图。）这种布置消除了反应堆冷却剂系统（RCS）中的弯曲连接管，因而降低了整个系统的流动阻力，改善了发生小破口失冷事故（LOCA）时的行为特性。此种简化安排还可以允许只为蒸汽发生器冷却剂泵联合体做一个支架，从而大大简化了 RCS 管道支架的布置。

AP-600 的另一个特点是装备了自然循环热交换器。这种交换器可以从处于高温高压下的 RCS 导出衰变热，因而无需设置泵送的应急给水安全系统。由于配备了由多个高压堆芯补充罐组成的重力驱动堆芯应急冷却系统（ECCS）、安全壳内部换料贮水槽以及其他的泄压能力，因而不需要泵送的 ECCS。

AP-600 概念中的安全壳冷却功能，也是靠非能动设备完成的。圆柱形钢安全壳建筑物四周，围以带通风的混凝土屏蔽性建筑物；靠这两个构筑物之间的气流把安全壳壳体的热量带走。水将依靠重力洒在钢壳体外表面上，可以在事故后的整整一天内通过这些水的蒸发提高传热系数。

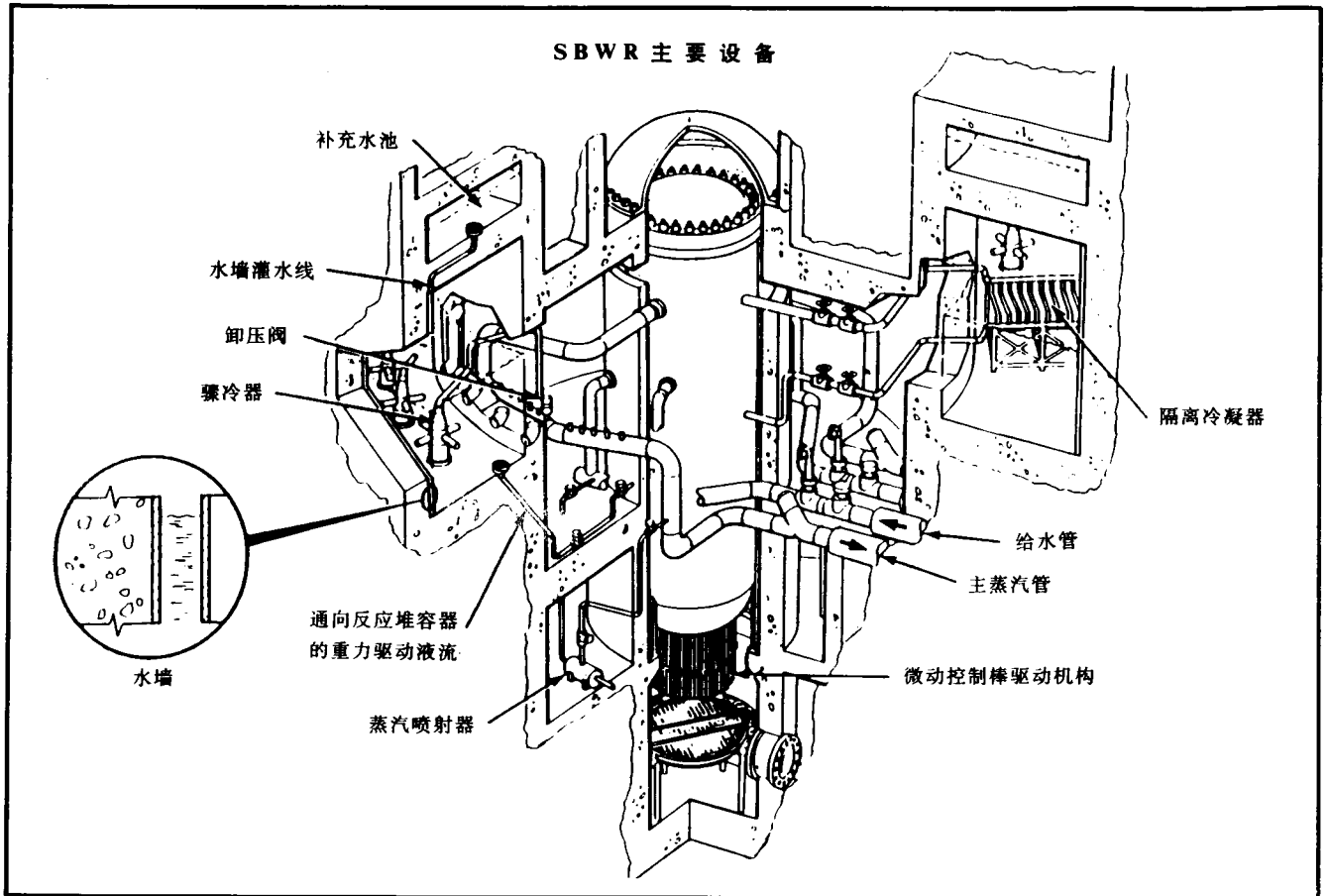
所有这些特点加起来，做到了借助非能动手段实现电厂全部必要的安全功能，而且大大减少所需的泵、阀门和相关的电气与冷却系统。

能动的堆芯应急冷却系统和相关的的泵、阀门与管道的取消，连同拥有的其他非能动设计特点，可使这一设计与常规相比大大简化。这种简化所带来的结果是，同西屋电气公司设计的常规 600 MWe 核电机组相比，AP-600 所需的大宗器材和部件大大减少。（见附表。）

**BWR 设计的概念。**一个以通用电气公司为首、

\* “AP-600 Development”, by Vijuk, R. and Bruschi, H., *Nuclear Engineering International*, 33, p. 23 (November 1988).

SBWR 主要设备



包括比奇特尔公司和麻省理工学院在内的一个设计队，正在研制非能动 ALWR 的 BWR 变型，他们称之为 SBWR。\* (见附图。)

SBWR 是一种旨在满足类似的宏伟目标的 600 MWe 反应堆，目标包括发生堆芯损伤事件后 3 天之内的不需操纵员介入，施工周期缩短到 3 年。

打算把 SBWR 堆设计成无需循环泵就能满功率运行。循环泵和管道的取消，可使反应堆容器设计简化，不易受到 LOCA 事件的损害，并可减少维修必要性。自然循环需要使用较大的反应堆容器，这样做的附带好处是在任何扰动因素出现的初期，堆芯上方都有较多的水。

SBWR 的各种安全设施都是富于想象力的，

\* "ASBWR, An Advanced Simplified Boiling Water Reactor", by Duncan, J. D. and McCandless, R. J., and "Improvements in Boiling Water Reactor Designs and Safety", by Wolfe, B. R. and Wilkins, D. R., *Proceedings International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (May 1988).

同时又十分简单。它们包括：重力排放冷却系统，该系统能使堆芯在发生失冷事故时被水覆盖和得到冷却；蒸汽喷射系统，该系统利用剩余蒸汽作驱动力，以便在所有交流电都丧失时，将水注入反应堆以补充漏掉的水；设在高位水箱内的隔离冷凝器，它能提供通过自然循环导出余热的能力；以及弛压式安全壳，在事故工况下它靠非能动设备冷却。

AP-600 和 SBWR 机组中的非能动安全设施提供的能力，可以应付所有设计基准事件，并且无需安全级应急柴油发电机或 1E 级交流配电系统。

#### 安全的一体化反应堆

除了 EPRI/DOE 计划中正在研制的 SBWR 和 AP-600 之外，后来又冒出一种安全的一体化反应堆 (SIR)，加入了先进非能动轻水堆设计竞赛的行列。这种反应堆目前正由燃烧工程公司、罗尔斯·罗伊斯联合有限公司、斯通和韦伯斯特工程公司，以及英国原子能管理局等在联合研制。\* 这种概念把一回路

\* "The SIR Project", by Hayns, M. *Atom* (June 1989).

