

西屋公司先进型压水堆核电机组AP1000技术经济特征综述

A Summary of the Main Technical and Economic Characteristics of Westinghouse Advanced Pressurized Water Reactor AP1000

顾军扬 陈芳 吴迪忠

(中国广东核电集团苏州核电研究所, 江苏苏州, 215004)

摘要 对西屋公司开发并正接受美国核管会(NRC)审查的先进非能动型压水堆核电机组AP1000的主要技术和经济特征作了综述, 特别对其安全性、经济性、仪控系统构架、模块化建造以及厂址适宜性作了重点描述与分析。

关键词 先进型 非能动 AP1000压水堆机组 技术经济特征

Abstract: This article sums up the main technical and economic characteristics of the advanced passive pressurized water reactor AP1000 which is developed by Westinghouse and being reviewed by US NRC. The safety, economics, I&C architecture, modularization construction and site accommodation are described and particularly analyzed in details.

Key words: Advanced Passive AP1000 PWR unit Technical and economic characteristics

1 AP1000的总体概况和研发进程

1.1 总体概况

AP1000是西屋公司开发的一种双环路1000 MW的压水堆核电机组, 在逻辑上是AP600的延伸, 保持了AP600的基本设计: 堆芯尺寸基本不变, 采用非能动的安全系统, 其设计与性能特点满足用户要求文件(URD)的要求。

西屋公司在开发AP1000之前, 已完成了AP600的开发工作, 并于1998年9月获得美国核管会(NRC)的最终设计批准(FDA), 1999年12月则获得NRC的设计许可证, 该设计许可证的有效期为15年。在为期7年的AP600的开发中, 西屋公司投入了大量设计与计算的人力, 并做了大量的实体试验, 召开了众多听证与答辩会, 因此AP600无论是其设计还是执照申请都是成熟的。

随着解除电力市场的管制, 世界电力市场已发生重大变化, 为提升竞争力, 核电新的目标电价降为3美分/kWh, AP600已无法满足这个要求, 为此西屋公司启动了AP1000的开发工作, 以期通过如下改进来达到提升竞争力的目的。

AP1000基本上保留了AP600核岛底座的尺寸, 并在AP600的基础上作了如下设计改进(两种堆型的比较见表1): 增加堆芯长度和燃料组件的数目; 加大核蒸汽供应系统主要部件的尺寸; 适当增加反应堆压力容器的高度; 采用 $\Delta 125$ 的蒸汽发生器, 每环路为50万kW; 采用大型密封反应堆主泵(装备有变速调节器); 采用大型的稳压器; 增加安全壳的高度; 增加某些非能动安全系统部件的容量; 增加汽轮机岛的尺寸和容量等。

1.2 研发进程

1999年12月AP600获得美国NRC的设计许可证后, 西屋公司依据电力市场的变化, 即启动了AP1000的

综述
核电设计
工程管理
工程建设
运行维护
核安全
核电前期
核电论坛
核电经济
核电国产化
核电质量保证
核电信息

研发工作。由于AP1000设计的指导思想是在AP600的基础上作最小修改以产生1000 MW以上的电力，故AP600的许多设计与试验结果被直接用于AP1000，AP1000相对于AP600的改进，则应用了西屋公司经验证的技术，因此其研发进程大大加快。2002年3月28日，西屋公司向美国NRC提交了AP1000的认证申请，其具体的研发进程如表2所示。

此最新的AP1000取证时间表，西屋公司的目标进度与NRC较保守的目标进度有一年的差距，但是目前NRC与西屋公司对于完成安全评估报告草案的时间完全一致。西屋公司已要求NRC进一步缩短其完成最终安全评估报告的里程碑时间。NRC已表示所留的时间过长，他们将努力压缩这一年的差异。

表1 AP1000和AP600主要技术参数

参数	AP1000堆芯参考电站比利时Doel-4/Tihange-3	AP600	AP1000
净电功率, MWe	985	610	1117
反应堆功率, MWt	2988	1933	3400
热段温度, °C	330	316	321
燃料组件数	157	145	157
燃料组件类型	17×17	17×17	17×17
活化燃料长度, cm	426.7	365.8	426.7
线功率密度, W/cm	164.7	134.5	187.3
压力容器内径, cm	398.8	398.8	398.8
蒸汽发生器表面积, m ²	6317	6968	11613
稳压器体积, m ³	39.6	45.3	59.5

表2 AP1000设计研发进程

里程碑	时间
西屋公司提交AP1000认证申请	2002/03/28
美NRC正式立案审查	2002/06/25
美NRC发出审查进度表	2002/07
美NRC提出补充资料（RAI）要求	2002/09
西屋公司送交全部补充资料给美NRC	2002/12/02
NRC确定安全分析报告草案中的待解决项	2003/02/28
西屋公司回答或解决相关待解决项	2003/04/15
NRC提出安全评估报告初稿	2003/06/16
反应堆安全专家委员会评审意见	预计2004/08
NRC发出最终安全评估报告（FSER）	预计2004/09
NRC颁发最终设计批准（FDA）	预计2004/10
NRC颁发设计许可证（DC）	预计2005/07

据此估计首台AP1000机组具备开工建设的时间为2005年。

2 AP1000的技术特点

AP1000是AP600的扩大容量版，其设计保留了AP600的主要特点，同时运用了一些已经验证的技术，其主要的技术特点如下：

2.1 AP1000的反应堆

AP1000的反应堆采用西屋成熟的Model 314技术，该技术已成功用于比利时Doel-4、Tihange-3和美国South Texas Project电站上。其重要工艺设备的主要特点如下：

2.1.1 反应堆压力容器

采用西屋公司三环路反应堆压力容器：

?157英尺（398.8 cm）压力容器内径，157个燃料组件（17×17），
?环形锻件结构，堆芯区域无焊缝，
?采用改进材料，达到60年寿期，
?西屋-CE堆芯围筒替代原先的径向反射层，
?顶部安装的堆内I&C系统，测点位置固定，数据在线读出，保证压力容器底部无贯穿件。

2.1.2 燃料组件

采用西屋Performance+燃料组件：

?包壳、格架、嵌环采用Zirlo™材料，
?抗碎片特性材料，
?中间搅混格架，
?一体化可燃吸收体，
?较大的裂变气体空腔，
?可拆装的低钴顶部喷嘴。

AP1000用157个Performance +XL组件，活化区长度为426.7 cm（14英尺）。AP600用145个Performance+组件，活化区长度为365.8 cm（12英尺）。

2.1.3 堆内构件

从反应堆压力容器顶盖安装堆芯测量装置，用西屋-CE堆芯围筒代替原先的径向反射层。

2.2 反应堆冷却系统

AP1000的反应堆冷却系统为二环路设计，每个环路通过冷却剂管道联接有一台大容量蒸汽发生器和两台密封式的冷却剂泵，此外冷却系统上还联接有一台稳压器。AP1000反应堆冷却系统的重要工艺设备的主要特点如下：

2.2.1 蒸汽发生器

?采用经验证的△125蒸汽发生器，其设计源自西屋-CE，已用于South Texas Project-1、-2和Arkansas-2等机组，

?设计特点，
—Inconel 690 TT管，
—不锈钢支撑板，
—改进的入口，

?良好的运行业绩，

?超过1200年的累积运行时间，总的管道堵塞率小于0.1%。

2.2.2 主冷却剂泵

采用已用于海军和西屋公司在运商用堆上的大型密封电动泵。

2.2.3 稳压器

相对于同容量的在运核电机组，加大了50%的水装量，以改善瞬态响应特性。

2.2.4 主回路管道

AP1000由于采用了非能动的安全系统，主回路管道数量相比于同容量的在运核电机组减少了70%。

2.3 安全系统

AP1000采用双层安全壳，并保留了AP600的非能动安全系统的构架，系统设计简化，安全性大大提高，其系统构成和特点如下：

2.3.1 非能动堆芯冷却系统

- ?系统容量增加以适应高的功率要求，
- 堆芯补水箱（CMT）容积增加25%，
- 换料水箱（IRWST）容积增加80%，
- 底坑注入量增加110%，
- 自动降压系统（ADS）容量增加90%，
- 非能动余热导出容量增加72%，

- ?系统功能的保持，
- 小破口情况下堆芯不裸露，
- 对燃料芯块中心温度（PCT）有大的裕量。

2.3.2 非能动安注系统

- ?保持了AP600的系统构架，
- ?加大的堆芯补水箱及其流动分配孔板，
- ?加大的换料水箱、再循环管和4路自动卸压系统的管道尺寸。

2.3.3 非能动的余热导出系统

- ?保持了AP600的系统构架，
- ?尺寸基于AP600的试验而定，
- ?与换料水箱相联，
- ?采用经验证的蒸汽发生器技术，
- 采用蒸汽发生器类同的平直管束及其联接方式，
- 3/4英寸Inconel 690管，
- 采用蒸汽发生器管的检查方法。

2.3.4 非能动的安全壳冷却系统

- ?设置有非能动安全壳水储存箱，
- 提供72小时冷却水供应，
- 冷却水流出量随时间而减小，

- ?非能动安全壳冷却水流动速率，
- 高的初始流量：快速形成水膜，有效降低安全壳压力，
- 随后流量随衰变热产生的大小而变化，

- ?增加了第三种不同形式的排水通道。

2.4 仪控系统的主要特征

- ?AP1000的仪控系统是基於Si zewel I B的全数字技术而开发完成的，特别采用了经验证的数字化安全系统，
- ?采用了紧凑型的工作站式的控制室，
- ?采用了先进的基于影像技术的人-机接口，
- ?依照NRC的审查准则而提出的AP1000人因工程设计，已作了完整的计划并已部分完成。

3 AP1000的安全性

3.1 AP1000的安全裕量见表3。

表3 AP1000的安全裕量

	典型电厂	AP600	AP1000
相对于DNBR限值的失流裕量	1%~5%	15.8%	19%
给水管破口的过冷裕量	>-18℃	77℃	60℃
蒸汽发生器管破损	操纵员要求在10分钟内动作	操纵员不需任何动作	同AP600

小破口LOCA	≤3英寸LOCA堆芯不裸露，PCT约 1500° F	≤8英寸LOCA堆芯不裸露	同AP600
大破口LOCA时PCT（具有不确定性）	1093~1204℃	913℃	1162℃

3.2 AP1000的堆芯熔化概率见表4。

表4 AP1000的堆芯熔化概率

美国NRC要求	在运电厂	URD要求	AP1000
1×10 ⁻⁴ /堆年	5×10 ⁻⁵ /堆年	1×10 ⁻⁵ /堆年	3×10 ⁻⁷ /堆年

4 AP1000的经济性

AP1000是AP600的增容版，相对于AP600所作改进，也都是采用一些经验证的部件与技术，因此AP1000是一种成熟的设计，它是可以确保投资保护的。

依据URD提供的投资估价基准，加上运用针对偶然性的概率方法，以及供货商提供的设备报价等，西屋公司已给出了AP600对于美国威斯康星州Kenosha Greenfield厂址的投资报价（见表5）：

表5 AP600基础投资价（1997年报价）

	基础价（美元/kW）	发电成本（美分/kWh）
首座单机组	1741	5.13
首座双机组	1520	4.66
第三座双机组	1397	4.39

注：发电成本中包含1.4美分的燃料、运行维护和退役费用。

以上AP600报价的可信性是基于以下三方面的理由：

？以上结论通过了美国电力研究所（EPRI）的审核，

？在准备匈牙利招投标时，得以证实，

？日本Obayashi公司研究结论表明：（1）AP600的36个月的建造周期不仅能够达到，而且还可进一步缩短；（2）相似的评价结果表明节省成本不仅可以在美国实现，而且也可在日本实现。

AP1000投资估价是基于AP600估价的基础。预计约15%总投资的增加，便能得到75%的功率提升。经估算第三座双AP1000机组的基础价为1150美元/kW，发电成本为3.6美分/kWh。相对于相同容量的在运压水堆机组，AP1000由于采用了非能动的安全系统，减少了50%的阀门、35%的泵、80%的管道、45%的抗震建筑和70%的电缆，从而投资大大下降而工期缩短。

5 成熟性

AP600经过7年的开发试验与论证，1999年12月得到NRC的最终设计批准，无论其设计还是执照申请都是成熟的。

AP1000保留了AP600的设计特点，是其增容版，相对于AP600所作的改进与变更都采用了经验证的成熟技术，因此AP1000是一种满足URD要求的成熟堆型。

6 AP1000的仪控结构与人机接口

AP1000全数字化仪控系统参照了Si zewel I B的设计。

6.1 先进的仪控系统的特点

？经验证的数字化安全系统，采用4选1结构，

？事故后的监测，

?紧凑型主控室，大屏幕显示屏，

?先进的报警系统，

- 遵循重要的报警信号优先报警的准则，
- 尽可能减少令人讨厌的报警次数，
- 报警图标显示于系统和部件图上并给出灵活的分类列表，
- 直接进入报警响应程序，

?为防止共模失效，

- 采用多样化的安全/非安全级I&C系统，
- 不致于导致同样的共模失效，
- 针对信息和控制的可进入性问题，则采用了多样性的人机接口媒体，
- 针对手动操作的可信任性问题，则采取纵深防御的分析措施，
- 仪控系统设计满足NRC的HICB BTP-19的要求。

6.2 仪控系统的人机接口

?采用紧凑型控制室，

- 电厂的运行由1个反应堆操纵员和1个监督员来完成，
- 如需要，控制室外可以容纳其他人员，

?显示，

- 由安置于墙上的大屏幕显示电厂的总体状况（非1E级），
- 详细情况则显示在工作站上（非1E级），
- 小部分安全级（1E级）或有多样性要求（非1E级）的数据则专门显示，

?控制，

- 对于正常运行采用软控制（Soft Control，非1E级），
- 设置少量针对安全级（1E级）和有多样性要求（非1E级）的专用开关，

?先进的报警管理，

?完全计算机化的程序。

7 AP1000的模块化和建设工期

7.1 AP1000的模块化建造

已作为AP1000电厂详细设计的组成部分，它直接带来了工期的缩短，同时潜在地节省了后续机组的投资。

7.2 AP1000的模块化类型

AP1000的模块分为结构模块、管道模块和设备模块。

AP1000结构模块分为以下几种模块：

- CA模块：为注入混凝土的钢支架模块，
- CB模块：定位用的钢模板模块，将在其周围注入混凝土，
- CG模块：置于某处而形成构筑物的一部分，但并不安装机械设备，
- CH模块：置于某处而形成构筑物的一部分，同时还安装某些机械设备，
- CS模块：钢楼梯模块。

表6 AP1000各种结构模块的数量及其所处位置

	CA	CB	CG	CH	CS	总计
安全壳内	15	13	0	9	4	41
辅助厂房	7	1	0	23	11	42
汽机厂房	1	0	4	12	12	29
备件厂房	0	0	0	0	10	10

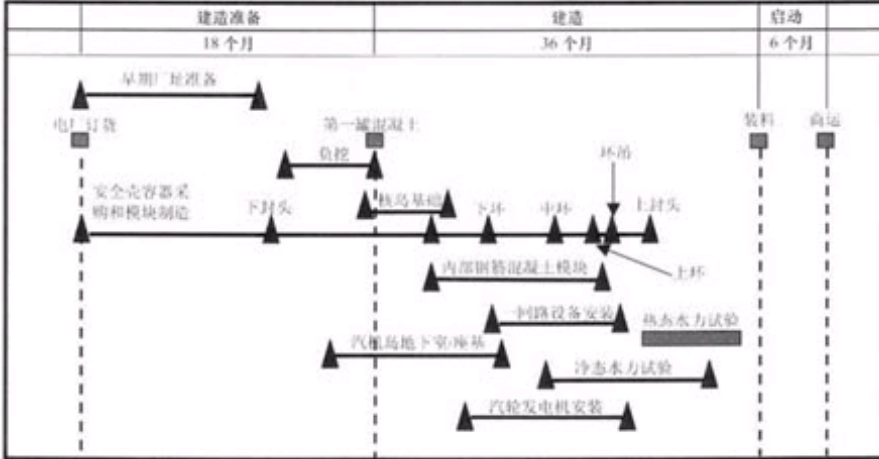
总计	23	14	4	44	37	122
----	----	----	---	----	----	-----

表7 AP1000管道和机械设备模块及其所处位置

	管道模块	机械设备模块	总计
安全壳中	20	12	32
辅助厂房	34	29	63
汽机厂房	45	14	59
总计	99	55	154

7.3 标准AP1000的总体建造进度见图1。

图1 标准 AP1000 的总体建造进度图



8 AP1000核电机组对厂址适宜性的分析

AP1000核电机组设计完全满足了URD的要求，URD对先进型轻水堆核电机组的厂址设计基准参数要求如下：

- (1) 高地下水位：低于厂址标高0.6 m。
- (2) 最大洪水（或海啸）水位：低于厂址标高0.3 m。
- (3) 最大降水（对厂房屋顶设计）：最大降雨速率为49.3 cm/hr，最大降雪荷载为2.354 kPa。

(4) 环境设计温度

· 5%超越概率水平

最高温度：在湿球温度25℃时干球温度为35℃，湿球温度26℃；
最低温度：-20℃。

· 1%超越概率水平

最高温度：在湿球温度25℃时干球温度为37.8℃，湿球温度26.7℃；
最低温度：-23.3℃。

· 0%超越概率水平（历史记录极值）

最高温度：在湿球温度26.7℃时干球温度为46.1℃，湿球温度27.2℃；
最低温度：-40℃。

(5) 极端风速

50年一遇基准风速为177 km/hr。

与安全无关的结构重要系数为1.0，与安全有关的结构重要系数为1.1。

(6) 龙卷风

- 最大风速：483 km/hr；
- 最大旋转风速：386 km/hr；
- 最大平移风速：97 km/hr；
- 最大风速旋转半径：45.7 m；
- 压降：13.827 kPa；
- 压降变化率：8.277 kPa/s；
- 飞射物按《标准审查大纲》（SRP）3.5.1.4节要求。

(7) 岩土参数

- 最小承载力：≥717.85 kPa（反应堆厂房和控制厂房地基）；
- 最小剪切波速：305 m/s；
- 在厂址安全停堆地震水平作用下无潜在液化土层。

(8) 地震

- 厂址安全停堆地震最大地面水平加速度0.3g；
- 厂址安全停堆地震设计反应谱采用NRC 1.60谱；
- 厂址安全停堆地震时程曲线应包络安全停堆地震反应谱。

(9) 大气弥散因子见表8。

表8 大气弥散因子参数

下风向距离	0~2 hr	0~8 hr	8~24 hr	1~4 d	4~30 d
0.8 km	1.0E-3				
3.2 km		1.35E-4	1.0E-4	5.4E-5	2.2E-5

9 AP1000堆型的评价意见

(1) AP1000保留了AP600的基础设计，为二环路1000 MW的先进型非能动的堆型，为了提高自身的容量，采用了经验证的成熟技术，比如西屋公司Model 314堆芯，西屋-CE的蒸汽发生器、用于美国海军的密封冷却主泵、全数字的仪控系统，经过以上设计改进，成为百万千瓦级的满足用户要求文件（URD）要求、设计成熟的堆型。

(2) AP1000通过反应堆设计改进，并保留了AP600的非能动安全系统的设计特点，大大提升了机组的安全性，其堆芯熔化概率达 3×10^{-7} /堆年，远低于URD的 10^{-5} /堆年的要求，反应堆的安全可靠性是有保证的。

(3) 开发AP1000的主要出发点是在保持AP600的先进性和安全性的前提下，通过提高机组容量水平来达到降低单位造价和发电成本的目的。经估算，AP1000相对于AP600，通过增加15%的投资，可达到提升75%功率水平的目的，据西屋公司提供的数据，第三座双堆电厂基础造价为1150美元/kW，发电成本为3.6美分/kWh，体现了良好的经济性。由于目前资料有限，AP1000的经济性有待进一步作调研。

(4) 我国大陆已通过初步可行性研究审查的核电候选厂址均能满足AP1000设计基准参数的要求，这表明AP1000核电机组在我国大陆核电候选厂址上都能建造。

(5) AP1000的模块化建造已成为AP1000电厂详细设计的组成部分，它使机组的建造工期缩短至36个月，同时潜在地节省了后续机组的投资。

(6) 西屋公司在2002年3月向美国核管会提交了AP1000的认证申请，目前正处于评估审查阶段，由于AP1000是AP600的扩大容量版，所作改进也运用了成熟技术，因此审查通过是不存在问题的。按AP1000的取证时间表，预期2005年7月可获得NRC对AP1000的设计许可证。

参考资料

1. 西屋公司."先进非能动型压水堆核电机组AP1000技术研讨会（北京）"资料，2001年11月.
2. 西屋公司. AP600标准安全分析报告.

