

核电建设周期、成本变化规律分析

康俊杰¹, 姚明涛², 朱清源¹

(1. 国核(北京)科学技术研究院, 北京 102209; 2. 国家发展和改革委员会能源研究所, 北京 100038)

摘要: 核电是中国能源供给侧结构性改革的重要选择。与传统能源不同, 核电有自身的发展规律。本文对全球不同时期不同技术、同一技术路线不同机组核电建设周期和建造成本变化的规律进行了分析。分析表明: 一是随着时代的发展, 核电建设周期和成本呈现总体上升趋势; 二是同一种技术路线下, 核电建设周期和成本都是逐步减少的。产生第一种现象的原因是因为社会对核电安全性的要求在提升, 相应的工程建设和设备制造难度在加大, 工程量在增加; 第二种现象是因为同一种技术路线下, 首台机组建设过程中设计变更等各种问题在后续建设中得到解决, 学习效应发挥作用, 建设周期和建造成本逐步减少。当前, 尽管我国在建的第三代核电项目首堆建设大幅度延期, 但可以乐观判断, 未来批量化建设后, 工期和成本都将大幅度下降。为此, 应坚定我国发展核电的政策和决心, 推动核电的最优化发展。

关键词: 核电; 建设周期; 建设成本

中图分类号: F407.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2355-(2016)06-0025-05

Doi: 10.3969/j.issn.1003-2355.2016.06.005

Abstract: Nuclear power is an important choice of energy supply side reforms for China. Different from traditional nuclear energy, nuclear power has its own law of development. In this paper, the variation laws of construction period and construction costs in international and domestic are analyzed, including the variations of nuclear power units in different period and the variations of nuclear power units using the same technique. Results show that the construction period and costs gradually increase with the development of modern society, but they significantly decrease in different units with the same type technique. The reason is that the higher security requirement result in difficulty increasing of engineering construction and equipment manufacturing; and when a large number of follow-up projects start constructing, the accumulated experience can be applied, the problem of design alteration is solved and learning effectiveness begins to play a role, subsequent construction process gradually smooth up and the duration has to be saved. At present, the construction period of the first reactor with the third generation technology is greatly extended, yet by optimistic judgment, the construction period and cost will be greatly reduced with mass construction. So the determination of developing nuclear power should be strengthen, and the policies to optimize development should be implemented.

Key words: Nuclear Power; Construction Period; Construction Costs

1 引言

2012年, 调整后的我国核电中长期发展规划要求到2020年我国在运核电达到5800万kW,

在建核电达到3000万kW, 国家“十三五”规划也重新确认了这一目标。据多家机构预测, 到2030年中国核电装机将超过1.5亿kW。目前,

收稿日期: 2016-04-15

基金项目: 本文受国家能源局课题“基于电价政策分析的土耳其核电报价策略研究”资助;

作者简介: 康俊杰(1980-), 管理学博士, 现为国核(北京)科学技术研究院工程师, 研究领域为核电技术经济、能源经济与政策。

国内在建的 AP1000、EPR 等三代核电机组在建设中都出现了工期拖延超预期、建设投资超概算的问题，并引起部分人的质疑。核电项目与其他电力项目不同，其建设有自身的发展规律。在“华龙一号”示范工程刚刚开工建设、CAP1400 示范工程即将开工建设之际，有必要对世界及中国核电建设周期、成本变化的规律进行总结，依此对未来中国核电新技术、新项目的建设有一个正确的认识和定位。

2 世界核电建设周期变化规律

2.1 核电站建设周期总体呈上升趋势

表 1 是全球核电站平均建设周期的分布表，可以看出，第一代核电机组的平均建设周期为 61 个月，1980 年之前开工的第二代核电机组平均建设周期为 64 个月，1980—2000 年期间开工的第二代核电机组的平均建设周期为 95 个月，本世纪新开工的二代机组已经上升到 120 个月。统计数据显示的三代核电机组平均建设周期是 78.5 个月，但是绝大多数三代核电机组目前仍处于在建阶段，统计的建设周期都是计划工期，实际建设中各类三代核电机组都出现严重拖期的现象，建成后的实际工期将远远超过 78.5 个月。

产生核电站建设周期延长的主要原因是社会对核电站安全性要求提高造成的。第一是电厂安全系统更加复杂，使施工工期增加。例如第一代核电项目没有安全壳和冷却系统，第二代核电增加了内安全壳、堆芯冷却系统，二代改进和三代核电项目都采用双层安全壳设计、增加多套冷却系统或采用非能动设计。第二是设备制造和安装难度逐步提升。例如压力容器、蒸汽发生器等很多设备由铸造改为锻造，各种泵阀制造材料由普通碳钢升级为高性能不锈钢，设备的压力和温度要求明显提升。这些都提高了施工和制造难度、增加了工期。

2.2 三代核电首批机组建设普遍存在严重拖期现象

当前已经建成和在建的三代核电首批机组都存在实际建设期远远超过设计期限、严重拖期的现象。如图 1 所示，采用俄罗斯 VVER (AES-91) 技术的田湾核电站 1 号机组预计工期为 60 个月，但是实际建设工期达到了 91 个月，拖期超过 31 个月¹。采用

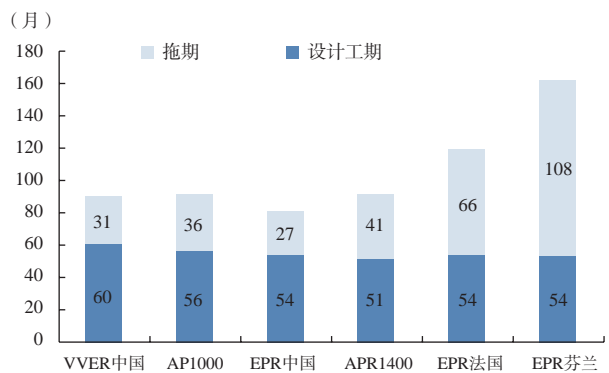
APR1400 技术的韩国 ShinKori3 核电站建设周期预计为 51 个月，截止到 2015 年底的建设工期已经达到了 86 个月，目前仍未运行。采用 AP1000 技术的三门核电 1 号机组和采用 EPR 技术的台山核电 1 号机组按照最快预期 2017 年 1 月上网发电，也将分别延期 36 个月和 27 个月。

表 1 全球核电站平均建设周期

地区	机组 (台)	装机容量 (万 kW)	建设周期 (月)			
			1980 年前	1980—1999 年	2000 年后	平均
第一代反应堆						
北美地区	14	179	51			51
欧洲经济区	43	752	60			60
经济互助委员会	4	35	89			89
东亚地区	1	14	56			56
全球	62	979	61			61
第二代反应堆						
北美地区	138	12620	69	130		101
拉丁美洲地区	8	606	74	150	250	178
欧洲经济区	142	13093	65	92	295	94
经济互助委员会及苏联	88	6154	63	87	223	97
东亚地区	117	10085	51	54	58	55
南亚地区	29	1027	65	139	81	95
西亚地区	1	92				
非洲地区	2	183	101			101
全球	525	43660	64	95	120	90
第三代反应堆 ^①						
北美地区	4	443			60	60
欧洲经济区	2	330			132	132
苏联	5	541			71	71
东亚地区	18	23003		87 ^②	76	77
西亚地区	4	536			60	60
南亚地区	2	183			127	127
全球	35	4344	0	87	78	78.5

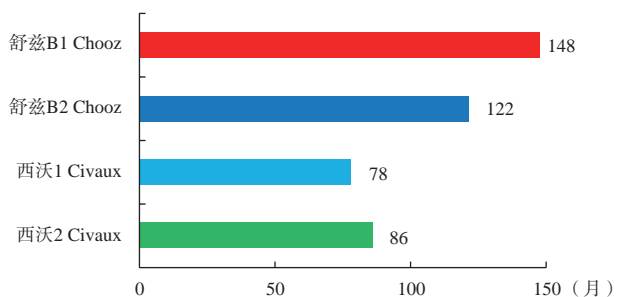
注：①第三代反应堆的建设周期为计划工期；②为实际工期。
数据来源：WNA, The World Nuclear Supply Chain Outlook 2030。

1 严格来讲 VVER 不属于第三代核电技术，但因其部分指标达到三代要求，很多国际机构将其列为第三代核电技术。表 1 中 WNA 把 VVER 列为第三代核电技术，本文为了统一标准，在分析时把 VVER 统一列为第三代核电技术。



注：VVER拖期为实际情况；其余的机组拖期为预计值；AP1000和EPR按照实际进度预测2017年1月上网发电计算；其余信息来源于 <http://www.world-nuclear.org>。

图1 已经开工的三代核电机组首堆建设周期变化图



数据来源：<http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>。

图2 法国N4机型系列核电站建设周期变化图

三代核电首台机组工程建设普遍延期的主要原因是各种三代技术都是按照目前最高的安全标准进行设计的，关键设备制造和工程建设的难度极大，导致首堆建设中设计更改、设备制造重复返工、工程建设返工和窝工等问题大量出现。例如VVER首批2台机组建设中进行了4万多项设计更改，窝工超过20个月；AP1000首批项目出现了主泵反复制造不过关的问题，返工和窝工超过24个月，韩国APR1400建设中关键电缆设备进行了多次的更换，耽误工期超过14个月。

2.3 同一技术后续机组建设周期呈现下降趋势

世界各种类型的压水堆核电站在批量化建设过程中，都呈现建设周期下降的趋势。如图2显示的法国在运最新型N4核电机组，其首堆的建设周期长达148个月，但是后续机组建设周期迅速下降，到第三台时已经下降到78个月，下降幅度达到47%。第四台机组进行了部分技术改进，建设周期有所增加，但仍然远远低于首批机组。

产生同一技术后续核电站建设周期下降趋势的主要原因是首堆建设过程中设计变更、关键设

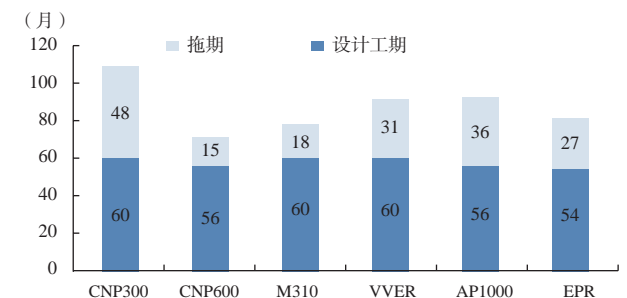
备制造困难、工程建设窝工和返工等一系列问题在后续建设中得到突破和解决，后续的施工过程更加顺畅和科学，工期得到节约。

3 国内核电建设周期变化规律分析

3.1 各类型压水堆首台机组建设都存在严重拖期现象

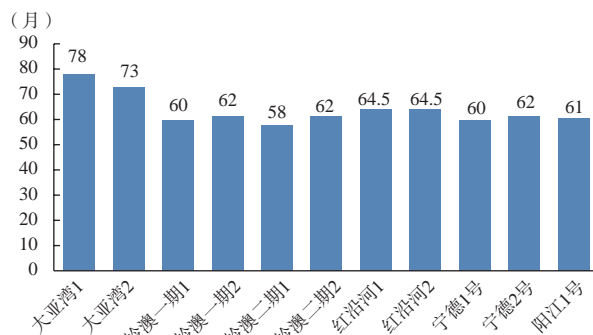
自中国第一台核电机组开工建设以来，除秦山三期重水堆外，其余所有类型的压水堆都存在首堆建设严重拖期的现象。如图3所示，中国自主研发的两环路压水堆CNP300建设工期长达108个月，拖期达到48个月；从法国引入非常成熟的、已经批量化建设的M310技术，首堆建设也拖期18个月。目前，建成和在建的全部6种类型压水堆首堆建设平均拖期为29个月，而CNP300、VVER、AP1000和EPR四种原创堆型首堆平均拖期达到了35.5个月。

各类型压水堆首台机组建设普遍存在严重工期拖延的原因是各类首堆建设中都存在设计变更，关键设备制造不过关、需要反复加工和检测，首堆建设缺乏施工经验、存在重复施工和大量窝工等问题。



数据来源：<http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>。

图3 国内各类型压水堆首堆建设周期变化图



数据来源：<http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>。

图4 国内M310/CPR系列核电机组建设周期变化图

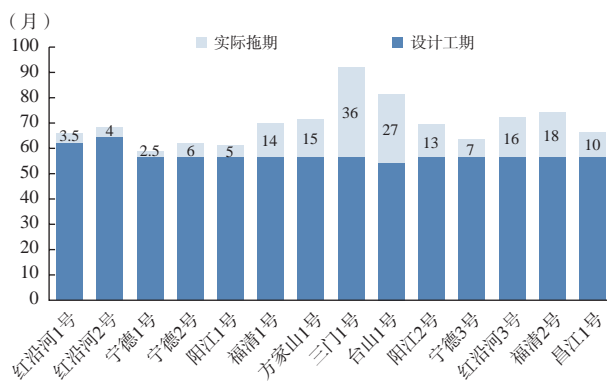
3.2 同型机组建设周期随数量的增加而缩短并趋于稳定

截止到2015年年底,我国共有28台核电机组投入商业运行,总装机容量2642万kW,平均计划工期为57个月,平均实际建设周期为69个月,其中M310/CPR系列形成批量化建设。通过图4可以看出,M310/CPR系列的建设周期随着数量的增加呈现工期逐步下降并趋于稳定的趋势,首批M310机组(大亚湾)的实际工期平均为75.5个月,第二批4台(岭澳)的实际工期平均为60.25个月,第三批(红沿河等)2台的实际工期平均为64.5个月(北方厂址由于气候原因,其平均建设周期相对长些),后续(宁德2台、阳江1台)的平均工期基本维持在61个月左右。

产生这种趋势的主要原因是随着核电站批量化建设的进行,同种技术的工程设计逐步实现标准化,关键设备国产化水平提高,设备制造和工程建设的技术成熟度增加,建设经验得到积累和及时反馈应用。

3.3 跨福岛核事故期间建设的核电机组普遍存在拖期现象

如图5所示,目前已经建成和在建的跨福岛核事故期间的核电机组都存在明显拖期的情况,在所有二代改进型机组中,CPR型号的8台机组拖期较短,平均为7个月;CNP型号的4台机组拖期较长,平均为14个月。在建的三代机组中,AP1000预计拖期为36个月,EPR为27个月。



注:三门1号和台山1号均预计2017年1月上网发电。

数据来源: <http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>。

图5 跨福岛核事故期间的核电机组建造周期图

工程建设拖期的原因一方面是由于福岛核事故发生后,国家要求全部在建核电厂停工进行安全检查;另一方面是部分二代改进型机组受福岛事件

影响进行了技术改进和设计变更,同时也出现了设备制造不合格、窝工和返工等问题。

4 核电建设成本变化趋势分析

4.1 全球核电成本总体呈现上升趋势

尽管采用了包括扩大单机容量、标准化设计、设计简化等方法来降低核电建设成本,但是全球的非亚洲国家核电建设成本总体上仍然呈现上升趋势。表2是各国不同年份核电建设成本的对比表,各国在2009年的核电成本都比1998年有了大幅度的提升。美国MIT在2003年的报告中估算美国新建核电站隔夜价为2000美元/kW,但是在2009年报告的隔夜价上升为4000美元/kW,增长了一倍^[3]。

表2 各国不同年度核电成本表

国家	堆型	建设成本 (美元/kW)		投资成本 (美元/kW)	
		1998年	2009年	1998年	2009年
欧洲	比利时 PWR (EPR)		4038		5339
	芬兰 BWR	2309		2735	
	法国 PWR	1675		2334	
		PWR (EPR)		2896	
	德国 PWR		3077		3767
	荷兰 PWR		3830		4788
	西班牙 PWR	2220		3027	
瑞士 PWR		3033		4210	
东亚	日本 BWR	2580		3220	
		ABWR		2257	
	韩国 PWR	1676	1407	2313	1755
北美	加拿大 PHWR	1737		2440	
	美国 APWR	1475	2537	2114	3223

注:1.投资成本是建设成本与利息之和。

2.数据来源于IEA,2001,Nuclear Power in the OECD,Paris:OECD;NEA&IEA,2010,Projected Costs of Generating Electricity,Paris:OECD。

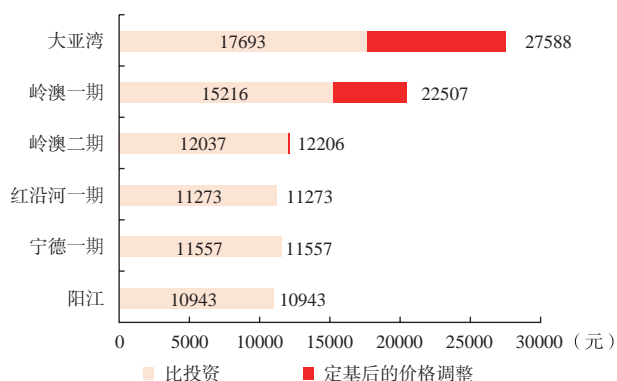
3.成本数据均为2000年价格。

全球核电投资成本呈现上升趋势主要有以下几个原因。一是新机组的高安全性要求导致核电厂的系统性能更加完善,关键设备的制造难度加大、制造费增加,人工成本和原材料成本大幅度提升。二是三哩岛核事故后新开工的核电机组大都没有形成批量化建设,研发设计费没有摊薄、设备制造的学习效应没有发挥、建设经验没有反

馈应用、群堆建设的范围效应没有体现。三是工程建设周期增加，工程拖期造成成本上升。根据芝加哥大学的数据分析，5年的建设周期利息占总成本的比例为30%，而7年的建设周期利息费用将达到总成本的40%。

4.2 国内同类型机组投资成本随数量的增加而下降

国内已经建成的核电机组投资成本维持在每千瓦1万元到1.8万元之间，平均为1.25万元，不同类型机组之间的成本之间没有明显的变化规律，但同类型的机组投资成本呈现明显的下降趋势。图6是国内M310/CPR系列核电机组批量建设的成本变化图，从法国引进的首批机组（功率为98.4万kW）比投资为1.8万元左右；初步国产化后的岭澳一期（功率为99万kW）比投资降为1.5万元左右，降幅为14%；批量建设后的红沿河、宁德、阳江核电厂（功率为108万kW）比投资已经下降到1.1万元左右，降幅超过35%。如果考虑到价格指数的变化情况，完全国产化后的机组比首批机组成本下降的幅度超过60%。



注：1. 本图中的数据根据各个项目的竣工结算报告计算得到；2. “定基后的价格调整”是指按2013年不变价格计算后的调整额。

图6 国内M310/CPR系列核电项目比投资变化图

同类型核电机组投资成本下降的原因主要包括以下几个方面：一是批量化建设带动国产化水平的提高，使蒸汽发生器、稳压器、主泵等关键设备迅速实现国产化，大幅度降低了设备采购的费用。二是批量化建设推动标准化的实现，使学习效应发挥作用，工程建设费用得到降低。三是批量化和国产化水平的提高使后续机组的设计费、技术转让费大幅度降低。四是批量化建设的经验得到及时反馈，工序合理、工期缩短，大大减少

了财务费用。五是国产化过程中装机容量上升，分摊了建设成本，降低了单位造价。

5 结论和启示

研究表明，随着对核电安全要求的增加、技术装备的升级，世界核电机组的建设工期和投资成本都呈现总体上升趋势；新技术应用的首批核电项目工程延误、造价提升问题是普遍存在的问题；随着核电机组后续规模化推广和应用，同一类型后续机组的建设周期会极大缩短，投资成本会显著降低。

当前，“华龙一号”示范工程已经开工建设，影响AP1000后续项目核准的主泵问题得到彻底解决，CAP1400也已完成安全评审、即将核准建设，核电将迎来新一轮发展的春天。“华龙一号”和CAP1400都属于新技术的首次应用，而AP1000未形成批量化建设。总之，核电的建设周期及成本等特有的发展规律会在核电的大规模建设中得到解决，我们必须对此有一个科学合理的认识，尊重和利用发展规律。严格按照既定的技术路线认真执行，努力推动核电项目的规模化、国产化发展，降低三代核电项目的投资成本，实现核电产业的最优化发展。

参考文献：

- [1] 袁家海, 徐燕, 雷祺. 电力行业煤炭消耗总量控制方案和政策研究[J]. 中国能源, 2015, 37(3): 11-17.
- [2] 赵永椿, 马斯鸣, 杨建平, 等. 燃煤电厂污染物超净排放的发展及现状[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2629-2634.
- [3] World Nuclear Association(WNA). The World Nuclear Supply Chain: Outlook 2030[R]. 2012.
- [4] International Energy Agency(IEA). Nuclear Power in the OECD[R]. 2001.
- [5] National Energy Administration(NEA), International Energy Agency(IEA). Projected Costs of Generating Electricity[R]. 2010.
- [6] 米森, 等. 国际核电成本分析及建安成本探讨[J]. 中国核工业, 2010, 8(8): 40-43.
- [7] 杨娟, 等. 国外核电产业发展前景与成本走势[J]. 中国物价, 2006, (9): 53-60.
- [8] 中国电力企业联合会(CEC). 电力发展战略重大问题调研报告[R]. 2013.
- [9] 杨光. 低碳发展模式下中国核电产业及核电经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.