

核电技术的现状和展望(一)

吉桂明 李 婕

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕 本文介绍了我国和世界核电的开发和应用情况。主要以前苏联为例,列举了核电站主要设备的主要技术——经济特性。文章最后展望了核电工程今后的工作。

关键词 核电站 反应堆 汽轮机 设备

分类号 TL413

1 前 言

1954年7月世界上第一座核电站——苏联核电站开始发电,开创了人类历史上和平利用原子能的新纪元,揭开了核能用于发电的序幕。

此后40年,由于核电技术日臻完善,与常规电站比较,核电站在环境保护、节省有机燃烧消耗等方面具有许多优越性,使得它在世界各国,尤其是一些发达国家中得到了迅猛发展。

1992年世界上拥有核电站的国家已达到30个,共有总装机电功率为418 GW的491台核发电机组,其中总装机电功率为350 GW的417台核发电机组正在运行。核电站共发电2200 TW·h,占各国总发电量的17%。全部核反应堆的工作时间达到6500个堆年。在一些国家核电站的发电量占主要地位,其中立陶宛为78%,法国为73%,比利时为60%,瑞典为54%,韩国为53%。此外,日本为34.7%,德国为34%,美国为21.8%。美

国核发电机组的数量(111台)、装机电功率(106 GW)和核电站发电量(640 TW·h)均占世界首位。

2 我国的情况

近10年我国核电事业亦已起步并有了很大的进展。秦山、大亚湾核电站已经投运,并正在陆续兴建一些新的核电站。到本世纪末,我国核电装机总功率将达到6000 MW。全都将是压水堆(PWR)核发电机组。计划到2015年装机电功率将达到30000 MW,21世纪中期核电站发电量将占总发电量20%以上。我国的方针是开发建设投资费用省的600 MW级PWR核发电机组,并将其作为标准机组。也将设计900 MW和1200 MW核发电机组供国内使用并出口。

2.1 秦山、大亚湾核电站

浙江秦山核电站是我国自行设计和建造的第一座核电站。PWR核发电机组的电功率为300 MW。该电站已于1991年12月投运,它

收稿日期 1994-07-11

本文联系人 吉桂明 男 57 高工 150036 哈尔滨 77-7 信箱

将建造具有同样功率的第二台核电机组。

广东省大亚湾核电站装有法国 Framatome 公司制造的单机电功率为 900 MW 的 2 台 PWR 核电机组,第一台机组已于 1993 年 10 月投运。

2.2 今后十年将要建造另外 10 台核电机组

在海南岛东奋建造一座 350 MW 核电站,后期还将建设第 2 台核电机组。

另一座核电站工程作业也已开始,核电站位于长江边上江西省的彭泽市。此核电站最终将拥有 6 个 600 MW 的反应堆。

辽宁核电站已进行了场地勘察选址工作,它将装设俄罗斯制造的单机功率为 1000 MW 的 2 台 BB3P—1000 型水水动力反应堆核电机组。

2.3 援外核电工程

根据 1991 年签订的协议,中国将援助巴基斯坦建造 Chashima 核电站,装用单机电功率为 300 MW 的 PWR 核电机组。

我国也正在谈判为伊朗建设一个安装 2 台单机电功率为 300 MW 核电机组的核电站。

2.4 台湾省的核电站

台湾省的核电事业发展较快,目前已拥有 3 个核电站,运行着 6 台核电机组。它们是装有 2 台核电机组(沸水堆,604 MW)的秦山核电站,装有 2 台核电机组(沸水堆,951 MW)的国盛核电站和装有 2 台核电机组(压

水堆,890 MW)的马鞍山核电站。核电站的发电量已占台湾各种电站总发电量的 38%。台湾还打算在洋老市建造第 4 个核电站,准备装用电功率为 1300—1400 MW 的核电机组。

3 开发和应用

世界各国中,美国西屋公司制造的核电机组最多,为 74 台;其次是法国 Framatome 公司制造了 60 台;前苏联(下称苏联)各企业制造了 56 台。

下面就核电站的五大主要设备的开发和应用情况,主要就苏联核电机组的设备作一介绍。

3.1 核反应堆

1992 年世界核动力的状况表明,核电站中最大数量的核反应堆型式是压水堆,为 240 个,占第二位的是沸水堆为 90 个。正在建造的核电机组中也有 75% 的反应堆是压水堆。

3.1.1 BB3P 型反应堆

苏联的 BB3P 水水动力反应堆即西方所说的压水堆。根据反应堆活性区比功,可把 BB3P 型反应堆分成三代:实验—工业反应堆 BB3P—210 和 BB3P—70、改进的 BB3P—440 型反应堆和 BB3P—1000 型反应堆,其主要技术——经济特性示于表 1。

表 1 BB3P 型反应堆主要的技术——经济特性

反应堆		BB3P—210	BB3P—365	BB3P—440	BB3P—1000
(首堆投运年份)		(1964 年)	(1969 年)	(1971 年)	(1980 年)
参数					
装置的电功率,	MW	3×70	5×73	2×220	2×500
反应堆热功率,	MW	760	1 325	1 375	3 000
核电站效率(净的),	%	25.5	25.7	29.7	31.7
一回路内的压力,	MPa	10.0	10.5	12.5	16.0

续表 1

反应堆 参数	(首堆投运年份)	BB3P-210 (1964 年)	BB3P-365 (1969 年)	BB3P-440 (1971 年)	BB3P-1000 (1980 年)
通过反应堆水的流量,	m ³ /h	31 500	44 700	39 000	80 000
反应堆入口的水温,	℃	250	250	268	289
反应堆内水的温升,	℃	20	25	34	32.0
活性区的尺寸(高度×直径),	mm	2 500×2 880	2 500×2 880	2 500×2 880	3 550×3 120
活性区的比功,	kW/L	46.6	81.0	84.4	111
燃料盒的数量		349	349	349	151
载热体在燃料盒内的速度,	m/s	2.7	4.2	4.2	5.3
载热体出口温度,	℃	270	275	302	322
反应堆的总高度,	mm	19 170	20 400	23 800	19 300
反应堆的质量,	t	470	523	573	730
单位投资费用,(1981 年价格)	卢布/kW	406	273	200	194
电力成本,(1981 年价格)	卢布/(kW·h)	0.95	0.743	0.643	0.573

3.1.2 PEMK 型反应堆

水石墨反应堆,其主要的技术—经济特性示

于表 2。
PEMK 型大功率沸水堆即是改进型槽式

表 2 PEMK 型反应堆主要的技术—经济特性

反应堆 参数	PEMK-1000	PEMK-1500	PEMK-2400
电功率,MW	1000	1500	2400
热功率,MW	3200	4800	6500
效率,%	30.4	31.4	37.0
载热体流量,t/h	37500	29000	33920
蒸汽生产量,t/h	5800	8800	9600
平均的湿度,%	15	27.5	过热蒸汽
汽轮机前的蒸汽参数:			
压力,MPa	6.5	6.5	6.5
温度,℃	280	280	450

续表 2

参数 \ 反应堆	PEMK-1000	PEMK-1500	PEMK-2400
活性区尺寸, mm:			
高度	7000	7000	7000
直径	11800	11800	宽 7500×长 2700
槽道数量:			
蒸发的	1693	1661	1920
蒸汽过热的	/	/	960
控制保护棒的数量	195	195	360

3.1.3 BII 型反应堆

外廓尺寸相当小及比功高,其主要的技术特

BII 型(快中子)反应堆的特点是活性区 性示于表 3。

表 3 快中子反应堆主要的技术特性

参数 \ 反应堆	BOP-60	BH-350	BH-600	BH-1600
热功率, MW	60	1000	1470	4000
电功率, MW	12	350	600	1600
效率(毛的), %	/	35	41	40
活性区尺寸, mm				
高度	400	1060	750	1100
直径	410	1500	2050	3300
活性区最大的比功, kW/L	1100	730	840	710
燃料烧尽深度, %	10	5	10	10
钠的温度, °C:				
反应堆出口处	500-600	500	550	530-550
反应堆入口处	360-450	300	380	360-380
蒸汽参数:				
压力, MPa	10.0	5.0	14.0	14.0
温度, °C	450-540	435	505	490-510

3.2 蒸汽发生器

西方惯用立式结构的蒸汽发生器,苏联通常是用卧式的,表4示出苏联诺沃—沃龙

涅什核电站装用的各型蒸汽发生器的主要特性。

表4 诺沃—沃龙涅什核电站蒸汽发生器的主要特性

参数 \ 核电机组	1号机组	2号机组	3号和4号机组	5号机组
反应堆型号	BBЭP-210	BBЭP-365	BBЭP-440	BBЭP-1000
蒸汽发生器型号	ПГБ-1	ПГБ-3	ПГБ-4M	ПГБ-1000
蒸汽发生器数量	6	8	6	4
蒸汽生产量,t/h	230	325	452	1469
出口处蒸汽压力,MPa	3.2	3.3	4.7	6.4
温度,℃:				
出口处蒸汽温度	236	238	259	278.5
给水温度	189	195	226	220
载热体压力,MPa	10.0	10.5	12.5	16.0
载热体温度,℃:				
进口温度	273	280	301	322
出口温度	252	252	268	290
换热面管子的直径和壁厚,mm	21×1.5	16×1.4	16×1.4	16×1.5
管子数量	2074	3664	5146	11000
换热面积,m ²	1300	1300	2500	6115
罩壳内径,mm	3010	3010	3200	4000
蒸汽发生器长度,mm	12400	12400	13000	13850
蒸汽发生器质量,t	104.2	112	145	200
投运年份	1963	1969	1971	1980

表5 苏联核电汽轮机的主要特性

名称	汽轮机型号	K-220-44-3	K-500-65	K-500-60	K-750-65	K-1000-60	TK-450/500-60	K-500-60-1500	K-1000-60/1500-1	K-1000-60/1500-2	K-1000-60/1500-3
反应堆型号	BB3P-440	BB3P-440	PEMK-1000	BB3P	PEMK-1500	BB3P-1000	BB3P-1000	BB3P-1000	BB3P-1000	BB3P-1000	BB3P-1000
额定功率, MW	235	500	500	520	750	1070	450用于热电联产情况 500用于凝汽式情况	500	1030	1100	1070
转子旋转频率, S ⁻¹	50	50	50	50	50	50		25	25	25	25
蒸汽的初压, MPa	4.3	6.4	6.4	5.9	6.4	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
蒸汽的初温, °C	254.9	280.4	280.4	274.3	280.4	274.3	274.3	274.3	274.3	274.3	274.3
凝汽器内的设计压力, kPa	3.2	3.9	3.9	3.9	4.4	3.9	9.4	5.9	3.9	3.9	5.9
中间再热后的压力, MPa	0.268	0.34	0.34	0.39	0.52	0.53	0.96	1.15	1.15	1.15	1.12
中间再热后的温度, °C	241	265	265	240	263	260	260	250	250	250	250
额定工况下的蒸汽流量, kg/s	404.2	744.4	744.4	832	1220	1747.2	876.9	899.62	1760	1711.1	1710.8
再生抽汽的数量, 个	8	6	6	7	6	7	7	7	7	7	7
再生系统的结构型式	5ПВД+Д ⁶ +3ПВД	5ПВД+Д	5ПВД+Д ¹²	4ПВД+Д ¹² +2ПВД	5ПВД+Д ¹²	5ПВД+Д ¹² +ПВД	5ПВД+Д ¹² +ПВД	4ПВД+Д ¹² +3ПВД	4ПВД+Д ¹² +3ПВД	4ПВД+Д ¹² +3ПВД	4ПВД+Д ¹² +3ПВД
给水预热的温度, °C	225	165	165	220	180	220	220	225	222	225	225
凝汽器冷却表面积, m ²	2×8170	4×10120	4×10120	3×8170	/	4×22500	2×19000	2×22550	2×45600	3×26880	2×34690
耗热率, kJ/(kW·h)	3.03	3.02	3.02	2.90	2.90	2.91	3.13	3.00	2.85	2.85	2.85
汽轮机的结构型式	ПВД+2ПВД	ПВД+4ПВД	ПВД+4ПВД	ПВД+3ПВД	ПВД+4ПВД	ПВД+4ПВД	ПВД+ПВД+2ПВД	ПВД+ПВД+ПВД	ПВД+ПВД+3ПВД	ПВД+3ПВД	ПВД+2ПВД

续表 5

名称	汽轮机型号	K-220-4+3	K-500-65	K-500-60	K-750-65	K-1000-60	TK-150/500-60	K-500-60-1500	K-1000-60/1500-1	K-1000-60/1500-2	K-1000-60/1500-3
级数:											
IBT		6	2×5	2	2×6	2×5	2×6	7	2×7	2×7	2×7
ICU		/	/	/	/	/	2×6	5	2×4	/	/
IULT		2×(2×5)	4×(2×5)	3×2	4×(2×5)	4×(2×5)	(2×3) +(2×4)	2×4	3×(2×5)	3×(2×7)	2×(2×7)
末级叶片高度,mm		1030	850	1030	1030	1200	940	1450	1450	1450	1450
末级平均直径,mm		2530	2350	2530	2530	3000	2390	4150	4150	4150	4150
出口(排汽)面积,m ²		4×8.19	8×6.28	6×8.19	8×8.19	8×11.30	4×7.05	2×18.91	6×18.91	6×18.91	4×18.91
汽轮机尺寸,m:											
长度		23.65	39.96	33	40.6	49.7	33.2	24.8	57.4	50.7	38.2
宽度		/	8.67	8.67	8.67	/	/	/	14.9	/	/
高度		/	4.27	5.25	5.25	/	/	/	10.6	/	/
汽轮机装置的质量,t:											
凝汽器		525	1326	1300	1647	2050	1400	1065	2280	1910	1700
汽轮机		796	1449	/	/	2260	1080	1400	/	3416	2297
低压缸转子		37.5	36.2	32.96	37.5	80.8	/	156	164	182	182

* IULT——低压预热器, J——除气器, IBT——高压预热器。
 ** IBT——高压汽缸, ICU——中压汽缸, IULT——低压汽缸。
 (下期续,主要内容:核电站的汽轮机的凝汽装置;核电汽轮机的汽水分离再热器;今后的工作展望。)

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1995 Vol. 10 No. 1

- △ **The Present status and Future Prospects of Nuclear Power Generation Technology**.....Ji Guiming, Li Jie(*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 1~7

This paper briefly describes the development and application of nuclear power generation both in China and around the world. Taking the former Soviet Union as an example, the authors list the main technico-economic characteristics of some major nuclear power plant equipment. In conclusion, a projection is given of the future advancement and potential development of nuclear power engineering projects. **Key words:** *nuclear power station, nuclear reactor, steam turbine, equipment*

- △ **The Development of the Test Stand of a Saturator, a Key Component in HAT Cycle**.....Jin Haiming(*Xi'an Jiaotong University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 8~12

The necessity of studying the properties of a saturator in HAT cycle has been pointed out by the author. The establishment of the saturator performance test stand at its preliminary stage created the experimental conditions for gaining an in-depth understanding of the saturator properties and undertaking the further study of the HAT cycle. **Key words:** *HAT cycle, saturator, Properties*

- △ **The Analysis of Factors Exercising an Influence on a Photoelectric Method Used for Measuring the Minute Solid Particle Concentration and Velocity in Gas-Solid Dual Phase Flows**.....Chen Yuandi, Wen Long(*Xi'an Jiaotong University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 13~18

A photoelectric detection method with the use of an optical fibre probe can be employed to measure the minute solid particle concentration and velocity in gas-solid dual phase flows, but both the construction of the optical fibre and the variation of the minute solid particle diameter may significantly affect the result of measurement and calculation. This paper gives a brief description of several types of optical fibre probes and their measurement performance and analyses the effect of minute solid particle on measurement outcome with an effective method for correcting invalid results being presented. **Key words:** *gas-solid dual phase flow, photoelectric detection, optical fibre probe construction, minute solid particle diameter*

- △ **Operating Characteristics of PFBC Pneumatically Controlled L Valve Slag Removal Mechanism**.....Rong Degang(*Thermal Energy Engineering Institute under South-Eastern University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 19~24

PFBC (pressurized fluidized bed combustion) combined gas-steam turbine plant power generation is a new type of coal-fired power generation system noted for its high efficiency and low environmental pollution. Against the background of the continuous slag removal version of a home-made PFBC-CC intermediate-test power station the author makes an exploratory study of the effect of system pressure, L valve inlet-outlet differential pressure, continuous and pulsating feeding of vibrating air