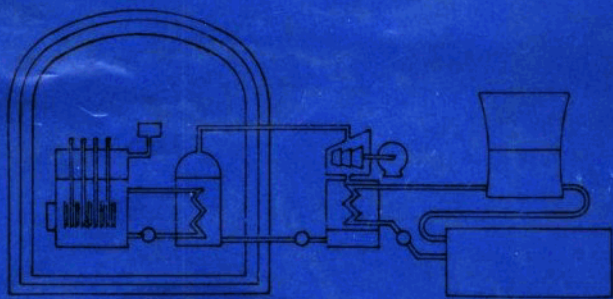


核电的现状和未来

武钢 编著



上海科学技术文献出版社

核电的现状和未来

武 钢 编著

上海科学技术文献出版社

(沪)新登字 301 号

核电的现状和未来

武 钢 编著

*

上海科学技术文献出版社出版

(上海市武康路 2 号 邮政编码:200031)

上海培云印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 1/32 开本 6.25 印张 162 千字

1994 年 3 月第 1 版 1994 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—1000

ISBN7-5439-0477-2/T·332 定价:12 元

前言

1991年12月,我国自行设计、建造的第一座核电站——秦山核电一厂正式并网发电,它向全世界宣告:中国大陆无核电的历史结束了!核电在我国的诞生使中国和平利用核能进入了一个新的领域,走上了一个新的台阶。李鹏总理指出:秦山工程与“亚洲一号”卫星发射成功一样,关系到振奋民族精神问题。

目前,我国的核电事业已纳入国民经济发展规划,该规划描绘了我国核电发展的三部曲:

1) 补充:本世纪内以掌握核电技术为主要目的,实现建成6000MW,在建6000MW的目标,使核发电量达到300kWh,成为全国总发电量中的一个补充。

2) 组成:到2015年,在我国东部地区,核电将会起到特殊的作用,成为我国电力工业的重要组成部分,预计核电装机容量将达到30000MW左右。

3) 支柱:到下世纪中叶,快中子增殖堆和聚变堆将相继发挥作用,核电会有更大的发展,成为我国电力工业三大支柱之一。

1993年,广东大亚湾核电站将投入运行。随后,秦山核电站二期工程、广东核电站等相断进入前期准备阶段。核电对于改善我国能源结构,减少环境污染,缓解交通运输紧张状态,将发挥越来越大的作用。核电事业的前景虽然是很光明的,但是我们必须认识到,由于我国核电事业起步较晚,综合国力也不强,要全面掌握大型核电站(主要指600MW以上的核电机组,而秦山核电站仅为300MW机组),尤其是百万千瓦核电站的设计、制造、加工和安装,以及安全保障等技术,尚需要一定的时间。因此,在相当一段时

期内,我国在大型核电站方面还不得不依靠引进。这种引进是高新技术的引进,是建立在积极吸收、消化的基础上的引进。因此,及时了解世界各国核电建设的经验、动态和发展趋势显得尤为重要。

本书详细分析了核电站的经济性、可靠性和安全性,介绍了世界上主要发达国家和我国核电建设的概况和经验,分析比较了各种先进的反应堆性能及核电技术,希望能有助于从事核电建设的工程技术人员核电站运行人员和管理人员,以及电力大专院校的师生了解核电技术的动态和趋势,起到咨询和参考的作用。

另外,本书还介绍了一些国家在对专业人员进行培训、运用宣传媒介向公众普及核电知识方面的经验。在我国还有相当一部分人对核电知之甚少,以致谈“核”色变,这与我们对核电知识的普及不力有关。例如:对前苏联切尔诺贝利核电站事故的报道,往往只强调其灾难性及后遗症的一面,而没有对公众说清楚切尔诺贝利核电站采用的是已经过时的、目前很少采用的石墨沸水堆,而且事故的发生完全是人为的误操作造成的。因此,不少人对核电有一种恐惧感。本书的目的也希望有助于广大读者从更深的层次全面、正确地了解核电,从而更加关心并支持我国的核电事业。

在本书的撰写过程中得到各方面的大力合作。许多长期从事核电建设的专家和工程技术人员为本书提供了丰富的、内容可靠的第一手资料,他们根据自身很高的理论学术水平和丰富的现场经验提出了许多宝贵的建议,对本书的完成无疑起到了重要的作用。全国核电技术信息网网长单位、电力工业部苏州热工研究所陈发培高级工程师对本书进行了最后审定,在此一并致谢。

武 钢

1993年7月

目 录

前 言

第一部分 世界各主要国家和地区核电建设概况和经验..... (1)

秦山核电站工程的回顾..... (2)

建设中的大亚湾核电站 (10)

台湾核电发展经验 (16)

美国核电之未来 (23)

法国核电建设的概况和经验 (42)

前苏联核电站的概况 (48)

英国核电站发展趋势 (63)

韩国核电建设的经验 (67)

第二部分 核电站的经济性、可靠性和安全性..... (76)

核电和燃煤发电成本的比较 (77)

核电站可行性研究工作程序 (84)

核电站厂用配电系统的可靠性 (88)

核电厂的整套保安系统 (93)

核电厂的射线照相检验..... (102)

核能——减少二氧化碳等污染气体排放的希望..... (104)

国际核事件标度..... (109)

第三部分 先进的反应堆技术..... (111)

ABB 原子能部的 PIUS 装置 (112)

西屋电气公司的 AP600 型反应堆 (118)

西屋电气公司的改进型压水堆..... (124)

ABB 燃烧工程系统 80+ (129)

核电国际公司的欧洲压水堆(EPR).....	(133)
快堆有了生机.....	(138)
堆芯不会溶化的反应堆将问世.....	(141)
模块化高温气冷堆的主要特点	(143)
具有“被动式”安全的核电站 PIUS——明天的核电机组	(150)
核动力堆的设计和技术发展趋势.....	(160)
HTTR 和部件设计	(164)
IAEA 老式反应堆工作组着眼于 V-230	(169)
第四部分 国外核电知识普及和培训系统.....	(172)
美国佛罗里达州的新能源信息中心.....	(173)
美国国家核电站培训机构.....	(179)
前苏联核电站的人员培训.....	(182)
法国模拟器为英国培训运行人员.....	(185)
小型压水堆模拟装置.....	(188)

第 一 部 分

世界各主要国家和地区 核电建设概况和经验

秦山核电站工程的回顾

1991年12月15日0点15分,我国自行设计、制造、安装的秦山核电站并网发电成功,从此结束了中国大陆无核电的历史,为我国和平利用原子能树立了里程碑。

为了迎接秦山核电站的全面调试任务,1989年7月成立了秦山核电站一期工程联合调试队。它由上海核工程研究设计院、秦山核电厂、105所等单位组成,下设11个专业组,共同承担秦山核电站一期工程的调试工作。

1990年4月完成了第一项调试——乏燃料系统的调试。经过一年多的努力,先后完成30多项在水压试验前必须完成的调试。1990年10月26日下午,向一回路系统充水准备进行水压试验。11月5日3时整一回路水压升到 219kgf/cm^2 试验压力,稳压18min,符合在 219kgf/cm^2 下稳压时间大于10min的规定要求,取得国家核安全局的认可。

1991年初进行一回路系统热态试验,1月19日16时40分一回路系统温度升到 242°C ,压力达到 117kgf/cm^2 时,采取了下列许多措施:将下泄流从 $11.2\text{m}^3/\text{h}$,降到 $7.8\text{m}^3/\text{h}$,以减少热量损失;在保证主泵轴密封水的情况下,尽量减少上充流量,使上充流的入口温度接近一回路系统的温度;利用取样间隔时间,把一回路系统和二回路系统所有取样管线均采取双重隔离阀隔离;环境温度提高到 $30-34^\circ\text{C}$,以减少一回路系统主设备的散热;将二回路系统的水和蒸汽释放量减至最低限底;加大稳压器与一回路系统温度差(90°C),再开两个喷雾阀加大循环量,使一回路系统温度

升到 272°C ，压力达到 132kgf/cm^2 ，并在此值上稳定升温升压。在 19 时 45 分，一回路系统温度达到 282°C ，压力正好达到 155kgf/cm^2 ，达到一回路系统热态试验额定参数值，并长期维持这一参数值进行多项热态试验。

装料前，在热态性能试验期间需要进行冷却剂系统药物分布试验。2 月 27 日，在化容系统化学添加箱中添加化学指示剂 LiOH ，注入一回路冷却剂系统，间隔指定时间取样分析表明，加入的添加剂能搅拌均匀分布于一回路冷却剂系统的两条环路中。

利用一回路系统蓄能和两台主泵运转产生的热能，在不配置启动锅炉的情况下进行了汽轮机冲转试验。在 3 月 29 日 19 时 43 分，汽轮机转速达到 3000r/min 。

从 1 月 26 日到 4 月 5 日进行热试验，在这段时间内安排 3 次升温升压，主要验证一回路系统是否能顺利达到 155kgf/cm^2 压力和 280°C 温度。在此过程中，进行振动测量、系统热膨胀测量（一回路系统主要管道和设备的热膨胀量的测量）、一回路系统泄漏率测量、一回路系统热损失量测量、稳压器喷雾阀及水位和压力控制试验、常规岛热态性能试验，并从一回路到二回路进行主蒸汽联动热态功能试验。各项试验成功后，于 4 月 5 日 6 时 30 分一回路系统从热态降到常温常压。

安全壳厂房是防止放射性泄漏到环境中的最后一道屏障，对核电站安全运行有着非常重要的意义。从 6 月 2 日 0 点整到 6 月 11 日 9 时整对秦山核电站仅为允许泄漏率的 28%。安全壳厂房在 3.05kgf/cm^2 强度试验压力下保持 2.5h，测得安全壳厂房最大纵变位 9.124mm ，横向最大变位 5.0mm ，均在设计允许值以下。

应急柴油发电机组性能试验是验证柴油机、调速器、发电机等的技术性能，并进行整机调整，使其满足设计要求。自 6 月 17 日起的 20 多天内，终于完成应急柴油发电机组的性能试验，为反应堆装料创造了有利条件。

装卸料机在经过机械调整和电气调整后,进行自动定位调试。秦山核电站反应堆堆芯内将装 121 束燃料组件。每束燃料组件的定位点必须具有 4 个方向的行驶正确性。每个定位点的 X、Y 坐标值,分别由装卸料机的桥架和小车驱动来执行。相邻燃料组件之间的间隙只有 1mm,故定位要求很高。对套筒导向轮多次反复调整,使套筒垂直度达到要求,再进行套筒与堆中心的对中,然后以中心位置为基准,根据刻度贴片,最后根据实际位置设置定位补偿。

根据《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例》和《核电厂安全许可证件的申请和颁发》中的要求,国家核安全局认为秦山核电站能够满足核安全的基本要求,具备首次装料的基本条件,于 1991 年 7 月 30 日批准秦山核电站首次装核燃料。8 月 2 日国家核安全局局长向秦山核电公司颁发了《首次装料许可证》。

1991 年 7 月 31 日,反应堆堆内用 2400ppm 的硼酸溶液充至堆芯出口接管中心线附近,核燃料运输通道内也充 4m 高的同浓度硼酸溶液。反应堆堆芯中安装三只临时中子探测器,它们与堆外两只源量程中子探测器一起监督装料过程中的中子数变化,以保证装料过程中的核临界安全。堆芯中还临时安装硼溶液取样器,定期采集堆芯不同高度硼酸溶液,用来分析堆芯硼浓度有无变化。

17 时 30 分,装有初级中子源的新燃料组件通过燃料运输小车,在燃料运输通道的硼水水下运到反应堆安全壳厂房。水下倾翻机把装有初级中子源燃料组件的燃料篮从水平位置升到垂直位置。装卸料机驶离堆芯,在燃料篮上方停稳,经对中后抓取装有初级中子源的燃料组件向反应堆堆芯方向驶去。在转折位置对中后,驶到堆芯上方,经精确对中后把第一组装有初级中子源的燃料组件准确地插入堆芯预定位置。对中子通道中子响应检查,100s 后中子计数稳定,装卸料机与新燃料组件脱扣。之后,开始安装第二个装有初级中子源的燃料组件。接下来是安装三种不同铀浓缩度的燃料组件。8 月 8 日晚当装卸料机把最后第 121 组燃料组件装

入反应堆堆芯时,秦山核电站首次装料宣告完成,它标志着秦山核电站建设进入一个新的阶段。

核燃料组件装毕后,压力壳顶盖随着扣盖,在一回路系统压力边界的设备、管道和阀门均调整完好,相关的辅助系统如化容、轴封、取样、停冷、设冷、疏排、硼回、废气、废液等系统都打通投入运行。一回路系统经充水放气,并维持在 30kgf/cm^2 压力和 60°C 温度下运行。经检查,条件正常后就进行一回路系统的密封性试验。8月24日15时30分开始升压,19时15分加压到规定的压力进行检漏,将发现的泄漏部位整治好,就完成了一回路系统的密封性试验。这项试验在当日完成。

8月22日开始,秦山核电站进入了装料后的冷热态调试阶段。装料后的冷热态调试主要是,试验核燃料装载后的一回路水力特性、控制棒驱动机构动作试验和堆内仪表试验等。装料后的冷态试验主要是,在有流量和无流量两种工况下对控制棒驱动机构进行控制棒单棒提升、下插、落棒试验,测定落棒时间,同时进行控制棒位置指示系统的试验。由于反应堆堆芯在装料后系统阻力发生变化,装料后的热态试验主要进行一回路系统流量测量试验,主泵惯性流量测定试验,稳压器压力、水位控制和喷雾性能试验,以及一回路系统散热损失测定试验等。上述各项试验结果均符合设计要求,并经国家核安全局现场监察员认可。

控制棒驱动机构的试验包括,控制棒驱动机构步进式试验、控制棒落棒时间试验,即在冷态无流量、全流量和热态无流量、全流量四种工况下,把控制棒提升到堆芯顶部(280步)位置,然后启动紧急停堆断路器,控制棒在重力作用下插到堆芯底部,以从紧急堆芯断路器启动到控制棒插到缓冲口顶部为考核时间,小于2s为合格;还要进行控制棒组件操作试验、控制棒组件自动操作试验,即从功率调节器输入控制棒动作的方向信号,控制棒应按自动程序提升和下降。

控制棒驱动机构试验结束后,按试验程序的要求作演示,由国家核安全局主检查员现场见证和记录确认。

在热态试验期间,控制棒组件进行了“跑合”试验,连续三昼夜进行控制棒的提升和下插试验,以消除控制棒提升和下插时的不灵活现象。

在各种准备工作就绪后,从10月29日开始向秦山核电站反应堆首次临界试验迈进。从当天16时开始,逐组逐段提升停堆棒和多组控制棒,A1、A2、T1、T2、T3棒组全部提升到顶,T4棒组提升到205步,中子计数率增长1.1倍。30日凌晨,应急稀释系统以6t/h稀释速率共注入总量60t的纯水,15h后中子计数增长到原来的5倍,第一阶段稀释工作结束。接着,以2t/h速率稀释,在中子计数率增长到原来的10倍时改为断续稀释。到10月31日7时整,反应堆已等待向临界过渡了。经研究计算,T4棒组从205步下插到170步,硼浓度再稀释12ppm。经计算,用20min,向一回路系统注入量后一吨纯水。接着,4T棒组提升7步,再提升7步,后又从第184步提升到205步,此时各点中子计数器、中子记录仪中观察到中子数不断增加,中子计数音响装置也发出“嘟嘟”声。上午10时50分,反应堆首次达到临界。

秦山核电站反应堆在10月31日初次临界后,经过一段时间的设备整治,接着进行低功率试验,用来验证堆芯、反应性控制系统、反应堆物理参数和屏蔽特性符合设计预计值,并为反应堆在较高功率下运行准备条件。

低功率试验分别在5%堆功率以下和15%堆功率以下进行,其中在5%堆功率以下进行反应堆物理试验和某些其它试验,在15%堆功率以下进行系统性能试验和汽轮发电机组初次并网试验。

下面分别对低功率试验期间进行的一回路系统试验和一、二回路整组启动并网予以介绍。

1. 一回路系统

进行部分堆芯控制保护系统试验和部分反应堆物理参数的测量,主要项目有:

1) 临界硼浓度测量。在热态零功率情况下,测量与控制棒位置对应的临界硼浓度。

2) 堆芯功率分布测定。在5%堆功率下,测量全堆中子通量分布并确定堆芯热管因子。

3) 慢化剂温度系数的测定。在热态零功率工况下,调节主冷却剂温度变化,由反应性变化求出慢化剂温度系数。

4) 主冷却剂自然循环试验。验证一回路主系统自然循环冷却能力。

5) 控制棒价值及硼价值测量。

6) 反应堆模拟机校正试验。

7) 重叠棒组价值和硼价值测量。

8) 一回路主系统硼化和稀释试验。测量冷却剂硼化和稀释曲线。

9) 控制棒驱动机构通风冷却系统试验。

10) 弹棒试验。

11) 放射性水平测定试验(部分)。

12) 核测系统探测器性能试验。

13) 反应堆功率控制系统试验。确认该系统能正常工作。

2. 一、二回路整组启动并网

初次临界前,曾利用主泵机械能和稳压器电加热器及一回路主系统的热容量产生蒸汽,进行了汽轮发电机组冲转试验。在低功率试验期间,主要利用堆芯释放的核热产生蒸汽,冲转汽轮发电机组,并进行其他项目的试验,主要有:

1)除氧器性能试验(部分)。

2)蒸汽发生器水位控制试验(部分)。确认蒸汽发生器水位控制系统(主给水 and 旁路控制)能正常工作。

3)汽轮发电机组启动试验。反应堆功率维持 8%，汽轮主汽门前蒸汽压力达 5.38MPa 以上，冷凝器真空保持 700mmHg，其他条件具备，即可按一定程序使汽轮机上升到额定转速(300r/min)。汽轮机空载，进行以下试验：

(1)汽轮机保护装置试验。验证报警、控制、联锁动作正确。

(2)汽轮机重要阀门动作试验。验证阀门功能正常。

(3)调节系统试验。验证 DEH 各种控制功能和调节性能符合操作，各报警、联锁、显示、打印正确。

4)发电机启动试验。在汽轮发电机组空载下进行下列试验：

(1)交流励磁机空载、短路特性试验。

(2)发电机空载、短路特性试验。

(3)自动电压调节器投入空载发电机试验。

(4)发电机自动准同步装置检查试验。

5)汽轮发电机组并网。上述各项试验完成后，反应堆在 110MW 堆功率时，进行发电机并网，一次成功，以 15MW 的电功率连续运行，低功率试验完成。

低功率试验结束后，核电站接着将进行功率试验，逐步提升功率在 30%、50%、75%和 100%堆功率下进行正常工况和模拟事故工况下的各类试验，以验证核电厂能按照设计要求，安全而有效地连续运行。

12 月 13 日 7 时 40 分二回路系统利用核热蒸汽冲转汽轮机到 3000r/min。在稳定运行工况下进行汽轮发电机组振动测量和汽轮机组空载特性试验。汽轮机特性试验完成以后，进行发电机空载特性试验。

12 月 14 日 23 时 40 分，手动把核反应堆功率提升到额定功

率的10%，约30MWe，把部分蒸汽通过汽机蒸汽旁路排放阀排放到主冷凝器，一回路系统平均温度维持在283℃左右，主蒸汽母管压力自动维持在64.5kgf/cm²。15日0点10分，得到华东电网总调度室批准，秦山核电站可以并入华东电网。于是进行并网操作，合上发电机出线开关，使发电机带上5%的电功率，同时逐渐关小汽机蒸汽旁路排放阀，15日0点15分，秦山核电站首次并网发电成功。

(杨国民，谢常岳)

建设中的大亚湾核电站

1. 大亚湾核电站系统、设备组成和特点

广东核电合营有限公司是中国、香港合资企业,经营大亚湾核电站的建设和运行。筹集4亿美元基金,75%由中方提供,25%由香港中华电力公司提供,其余资金由核电合营有限公司向国外贷款。到建成发电时,包括贷款利息,总投资约40亿美元。

大亚湾核电站占地198ha,厂区占地63.5ha,厂区建筑面积20多万平方米。总装机容量1800MW,年发电量100kWh,其中70%输往香港,30%输往大陆。

该电站引进法国法马通公司(FAR)2座M310型压水堆,引进英国通用电气公司(GEC)2台900MW汽轮发电机组。按国际投标形式招标签定合同,土方及海堤工程由吉林公司承包,码头工程由中航四局承包,厂区土建由合营核电建设公司(HCCM)承包。核岛安装由法马通、斯比公司(FAR/SB)主承包,核工业总公司23建设公司(深圳)分包,常规岛安装由山东核电公司承包,厂间区安装由东北核电公司承包。大件运输由中国汽车运输公司分包。于1986年10月7日破土动工,1987年8月7日浇灌第一罐混凝土,计划1993年全部建成并网发电。

大亚湾核电站是一座具有现代技术水平的百万千瓦级双堆核电站,设备先进,系统合理。在建设中,建立了完整的质保体系,制定了切实可行的施工计划。根据合同条款,用经济约束形式来保证工程质量和进度。

1) 核岛

核岛由蒸汽供应系统(NSSS)、反应堆安全系统、反应堆辅助