

BBSP

000746

VVER
压水堆核电机组

唐芳文 翟彦彬 郭嘉凯编

石油工业出版社

前 言

前苏联是世界上发展核电最早的国家之一。在1990年，苏联核电的总装机容量在世界上占第三位。但是苏联也发生过世界上最严重的核事故——切尔诺贝利事故。苏联核电机组的性能到底如何？特别是压水堆机组的性能如何？这是很多人所关心的问题。我们对前苏联压水堆机组（包括苏联出口到其它国家的机组）的性能进行了广泛的调查研究，写出了本书。

本书经过张桦、韩梵珠等同志的审查，并提出了宝贵的意见，我们表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免有许多缺点和错误，恳请同志们批评指正。

1992年12月于北京

目 录

一、概述 (1)

1. 苏联核电的发展过程 (1)
2. 苏联核电的现状 (5)
3. 研制的新型机组 (13)
4. 苏联核电的出口情况 (19)

二、苏联压水堆核电机组的发展过程 (22)

1. 第一阶段VVER-440型机组 (22)
2. 第二阶段VVER-440型机组 (24)
3. 第三阶段VVER-1000型机组 (24)

三、VVER-1000型压水堆机组简介 (31)

1. 压水堆机组的主要参数 (31)
2. 反应堆结构 (33)
3. 一回路 (37)
4. 二回路 (38)
5. 工程安全系统 (40)
6. 辅助系统 (42)
7. 核电机组的自动控制和仪表系统 (42)

四、苏联压水堆机组的性能	(44)
1. 核电机组的运行性能	(44)
2. 核电站工作人员的辐照剂量	(54)
3. 压水堆机组在运行中出现的一些问题及其对策	(57)
4. 压水堆核电站对健康和环境的影响	(76)
5. 对VVER 机组的审评情况	(86)
参考文献	(94)

一、概 述

1991年12月25日，前苏联总统戈尔巴乔夫宣布苏联到同年12月31日解体。前苏联解体后，各加盟共和国都独立了，成为独立的主权国家，其中11个国家又成立了“独立国家联合体”（简称独联体）。

由于各个加盟共和国独立不久，独联体成立的时间更短，有关它们的经济发展计划，特别是核电发展计划的资料还没有见到，所以本文的内容还是指前苏联范围内的核电情况，而且仍称苏联。

1. 苏联核电的发展过程

1) 机组类型的发展过程

核能的利用首先是在军事上，在第二次世界大战末，美国首先利用原子弹轰炸日本的广岛、长崎。第二次世界大战结束后，很多科学家都在致力于和平利用核能的研究。在1954年6月27日苏联建成了世界上第一座核电机组，成为电力发展史上的一个新的里程碑。这台核电机组建在莫斯科近郊的奥布宁斯克，电功率为5MW，反应堆类型是石墨水冷堆。

苏联在建成第一座核电站后，就大力发展动力反应堆，在军事上用于潜水艇的动力，即核潜艇。在和平利用方面，除了用于发电外，还建造了“列宁”号核动力的破冰船，用于北冰洋的破冰。

苏联开始研制核电机组的类型是以石墨水冷堆（BMKR）为主，还研制过压水堆、沸水堆、有机堆、快堆等核电机组。在1959年建成一台快堆试验机组，功率11MW，在1963年

建成一座用有机溶液冷却的反应堆机组（美列斯克核电站），功率为1 MW，在1965年建成一座沸水堆，功率为70 MW。直到1980年以前苏联都是以建石墨水冷堆机组为主，压水堆机组为辅。由于压水堆结构紧凑、体积小，适用于作核潜艇的动力，苏联从七十年代开始，就集中力量发展压水堆机组。从八十年代初期开始，计划建的核电站就是以压水堆机组为主了。到1986年发生切尔诺贝利事故后，计划建的石墨水冷堆机组都取消了，甚至在建的也取消了，商用核电机组都是建压水堆机组。

苏联的核电在1970年以前是属于早期发展的起步阶段，这时期建的都是小机组，因此核电机组的容量增加不是很快。1970~1986年是快速发展时期。在1970年核电装机容量为1537MW，到1985年增加到26099MW，即在15年的时间，装机容量增加了17倍，平均每年增加1600MW以上，特别是1983~1985年的两年中就增加了7744MW。

苏联的第11个五年计划（1981~1985年）中核电的发展计划没有完成。这说明苏联核电的发展速度与实际要求相比相对慢了。1986年的切尔诺贝利事故给苏联核电发展带来严重的不利后果，阻碍了核电的发展。这次事故使得在苏联也出现了反核运动，公众对核电站的安全担心，反对建核电站，甚至对核电站的工作人员进行恐吓。这样使核电站的选址遇到很大的困难。不少计划建的核电站被取消，核电计划大大地缩小。

尽管苏联核电的发展受到很大的阻力，但从能源资源的需要出发，特别是在苏联的欧洲部分更是需要发展核电，所以苏联还要继续发展核电。现在苏联加强同国外的合作，特别是同国际原子能机构和西方核工业发达的国家合作，请国际原子能机构的专家对苏联的核电站（如罗夫诺核电站）进

行审评。引进国外的先进设备，例如德国西门子的监测系统安装到压水堆机组上。苏联还在研制新的、更加安全的核电机组，例如VVER-1000，91型和92型，准备今后大力发展核电。

2) 苏联具有完整的、独立的核工业体系

核电工业是从核军事工业分出来的，发展成一个独立的工业体系。在五、六十年代，苏联为了和美国抗衡，搞军事竞争，大力发展核工业，与此同时，无论是核燃料循环体系还是核电站设备都形成了完整的、独立的核电工业体系。

苏联的核电是在集中统一领导下发展起来的。苏联国家原子能利用委员会主管核燃料循环并参加核电站的调试启动工作。苏联国家原子能监督委员会负责核监督方面的工作（相当于我国的国家核安全局）。在切尔诺贝利事故以前，核电站的设计、安装、施工和运行都是由苏联电力和电气化部管理的，在事故以后，即1986年，为了加强对核电的管理，又成立了原子能部专管核电。苏联的核电站还向国外出口，原子能出口公司和国外原子能建设公司专门负责核电站出口方面的工作。

苏联是独立发展核电的国家，而且建了很多核电站。在核电站的设计、制造、施工、运行、选址及管理各个阶段都形成了一整套的规章制度。苏联的核安全标准、规范分为三级，是一个三角形的三级。第一级是国家法令或根据法令制定的有法令效力的条款，如水利、土地及资源利用等法令，还准备制定原子能法。第二级是标准与法规。这是对核与放射性安全的基本要求，提出具体的限制数字、条件和范围，例如《核电站的设计、施工和运行安全保障总则(ОПБ-88)》。第三级是专门的规范、标准，类似于守则，例如辐射安全标准，基本卫生导则等等。

苏联是独立发展核电的,因此,在核工程的理论研究、应用研究和工程验证性试验研究都自成体系,而且布局广泛,从而构成了苏联发展核电的坚实基础之一。苏联的核能研究设计院,除核能的基础性能研究和核电工程的设计任务外,集中进行应用性研究和验证性试验。

库尔恰托夫原子能研究院是苏联的一个综合性核能基础研究和应用研究基地,主要负责有关反应堆总的科学研究以及反应堆物理研究。“水压机(Гидропресс)”研究设计院负责核蒸汽供应系统主要设备的设计工作,它拥有自己的各种试验台架。原子动力设计总院及有关分院负责核电站的工程设计。莫斯科水工研究院有土壤学和地震学实验室,装有大型地震试验台。还有很多设备制造厂都有自己产品的验证性试验设备,例如原子能机械生产联合公司拥有装卸料机的试验台架,3个堆本体组装和性能试验台架、堆内构件组装试验台架和12个驱动机构热态试验台架。苏梅水泵厂装有3个反应堆主泵的全流量热态试验台架。

苏联有制造核电站设备的完整工业体系,核燃料从铀矿开采到燃料组件的制造、后处理以及核电站各种设备的制造都有完整的工业生产体系。苏联具有每年生产13000MW核电设备的能力,生产的主要机组类型是VVER-1000和ACT-500型(后者是供热堆)。原子能机械生产联合公司是制造核电设备的综合性工厂,目前已形成每年生产4套1000MW核电设备的能力,二期工程完成后能每年生产8套1000MW核电的设备。主泵是由乌克兰的苏梅科学技术联合制造公司制造的。该公司还制造给水泵、凝结水泵、真空泵、热交换器等。

核电站用的汽轮机主要是由哈尔科夫二厂生产。苏联能生产1500转/分和3000转/分的汽轮机。

发电机是由《电力》联合公司的《电力》工厂生产的，能生产1500转/分和3000转/分的发电机。

还有很多工厂都参与了核电站设备、仪表等的制造工作。

过去的苏联是比较封闭的，在核电领域中只是在经互会国家之间进行合作，与西方国家的交流比较少。直到切尔诺贝利事故以后，和国际原子能机构、西方国家的技术交流才多起来。现在，无论是在设计标准，还是在运行经验方面都吸收西方国家好的技术和经验，也引进世界各国的先进设备（如控制仪表等）。这对提高苏联核电设备的可靠性是大有益处的，苏联核电设备的性能将会有进一步提高。

2. 苏联核电的现状

苏联是世界上建第一座核电站的国家。它的核电发展速度比较快。到1990年7月31日，苏联在运行中的核电机组有59台，总装机容量是38424MW；在建的核电机组有25台，总装机容量为电功率22800MW，还有总容量（热功率）为1000MW的供热堆。计划建的为12台，总电功率为8400MW，总供热功率为1500MW。关闭5台核电机组，总功率为2134MW。取消或无限期延期的有17台机组，总电功率为15860MW，总供热功率1000MW⁽¹⁾。详细情况见表1-1。

自从切尔诺贝利事故发生以后，新投入的机组逐渐减少，在1987年有4台新的核电机组投入运行，1988年只有一台投入运行，1989年2台投入运行，1990年1台投入运行。1989年苏联的核发电量占它的总发电量的12.5%，而在工业发达的地区，核电占的比例要大。例如，伏尔加地区是16.7%，中央地区是21.7%，西北地区是33.1%，乌克兰是22.7%⁽²⁾。

**表1-1 (1) 1990年7月31日, 苏联运行的
核电机组一览表**

核 电 站 名 称	机 组 号	功率, MW	投运时间
沸水堆机组			
美列克斯	VK50	62	1966
小 计	1 台	62	
快中子堆机组			
别洛雅尔斯克	BN-600	600	1981
舍甫琴柯	BN-350	150	1973
美列克斯	BOR60	12	1970
奥布宁斯克	BR 5	15	1959
小 计	4 台	777	
石墨水冷堆机组			
别洛雅尔斯克	2	160	1969
比利宾	1	12	1974
	2	12	1975
	3	12	1976
	4	12	1977
切尔诺贝利	1	1000	1978
	2	1000	1979
	3	1000	1982
伊格纳林纳	1	1500	1985
	2	1500	1987
库尔斯克	1	1000	1977
	2	1000	1979
	3	1000	1984
	4	1000	1986
列宁格勒	1	1000	1974
	2	1000	1976

表 1-1 (1) 续

核 电 站 名 称	机 组 号	功率, MW	投运时间
列宁格勒	3	1000	1980
	4	1000	1981
奥布宁斯克	APS	5	1954
斯摩棱斯克	1	1000	1983
	2	1000	1985
	3	1000	
特阿特斯克 (西伯利亚)	1	100	1958
	2	100	1959
	3	100	1960
	4		1960
	5		1961
	6		1963
小 计	28台	17831	
有机堆机组			
美列斯克	Arbus	5	1963
小 计	1 台	5	
压水堆机组			
巴拉科夫	1	1000	1986
	2	1000	1988
	3	1000	1990
加里宁	1	1000	1985
	2	1000	1987
赫梅利尼茨基	1	1000	
科拉	1	440	1973
	2	440	1975
	3	440	1982
	4	440	1984

表 1-1 (1) 续

核 电 站 名 称	机 组 号	功率, MW	投运时间
新沃罗涅什	2	365	1970
	3	417	1972
	4	417	1973
	5	1000	1981
罗 夫 诺	1	392	1981
	2	416	1982
	3	1000	1987
南乌克兰	1	1000	1983
	2	1000	1985
	3	1000	
扎波罗热	1	1000	1985
	2	1000	1985
	3	1000	1987
	4	1000	1988
	5	1000	1990
小 计	25台	19767	
总 计	59台	38424	

表1-1 (2) 到1990年7月31日, 苏联在建
核电机组一览表

核 电 站 名 称	机 组 号	功率, MW	预计投运时间
沸水堆机组			
沃罗涅什	1	—	
	2	—	

表 1-1 (2) 续

核 电 站 名 称	机 组 号	功率, MW	预计投运时间
快堆机组			
别洛雅尔斯克 4	BN800	800	
石墨水冷堆机组			
库尔斯克	5	1000	
压水堆机组			
阿克塔什	1	1000	
	2	1000	
巴拉科夫	4	1000	
	5	1000	
	6	1000	
加里宁	3	1000	
	4	1000	
赫梅利尼茨基	2	1000	
	3	1000	
	4	1000	
科斯特罗马	1	1000	
	2	1000	
罗斯托夫	1	1000	
	2	1000	
	3		
	4		
南乌克兰	4		
塔塔尔	1		
	2		
扎波罗热	6		
罗夫诺	4		
总 计	25台		

表1-1 (3) 1990年7月31日苏联计划建的核电机组

核电机组名称	机组号	类 型	功率, MW
南乌拉斯	1	快 堆	800
	2	快 堆	800
	3	快 堆	800
小 计	3 台		2400
阿尔汉格尔斯克	1	压 水 堆	—
	2	压 水 堆	—
勃良斯克	1	压 水 堆	—
科 拉	5	压 水 堆	1000
	6		
科斯特罗马	3		
	4		
塔塔尔	3		
	4		
总 计	25台		

表1-1 (4) 到1990年7月, 苏联关闭的核电机组

核电机组名称	机组号	类 型	功率 MW	投运时间	关闭时间
别洛雅尔斯克	1	石墨水冷堆	108	1964	1983
切尔诺贝利	4	石墨水冷堆	1000	1984	1986.4
亚美尼亚	1	压 水 堆	408	1979	1989.2
	2	压 水 堆	408	1980	1989.3
新沃罗涅什	1	压 水 堆	210	1964	1988.2
总 计	5 台		2134		

表1-1 (5) 到1990年7月, 苏联取消或无限期

延长的核电机组

核 电 站 名 称	机 组 号	类 型	功率, MW
高尔基	1	沸 水 堆	
	2	沸 水 堆	
BN-1600		快 堆	1600
切尔诺贝利	5	石墨水冷堆	1000
	6	石墨水冷堆	1000
伊格纳林纳	3	石墨水冷堆	1500
库尔斯克	6	石墨水冷堆	1000
斯摩棱斯克	4	石墨水冷堆	1000
阿塞拜疆			1000
巴什基尔	1		1000
	2		1000
格鲁吉亚			1000
克拉斯诺达尔	1	压 水 堆	1000
明斯克	1		940
	2		940
敖德萨	1		940
	2		940
总 计	17台		15860

苏联核电站的建设是没有完成计划的。在苏联第12个五年计划期间(1986~1990年)实际建成的核电站比原计划约少25000MW。

苏联建的第一台核电机组就是RBMK型的石墨水冷堆机组。在六、七十年代都是以建这种堆型的核电机组为主。由于压水堆机组的一些性能较为优越,从八十年代开始,苏联在建和计划建的核电机组转为以压水堆机组(即VVER型核

电机组)为主。直到1986年发生切尔诺贝利事故后,石墨水冷堆机组就停止发展了,甚至在建的也停建了。

苏联在发展轻水堆的同时,也在研制和建造快中子增殖堆的实验机组。例如在1980年建成了600MW的BN-600型快堆机组。

切尔诺贝利事故后,害怕核电的人多了,反对发展核电的人也多了。某些有权威的科学家、政府和新闻界的人士都反对核电。他们认为,现在运行的核电站不够安全,新一代的、安全的核电机组发展得很慢,而且放射性废物的处置问题也没有很好的解决。

在苏联,由于核电失去信誉,反核情绪上升,使该电站的工作人员受到监视、嘲笑和恐吓,这样导致核电工程项目急剧减少。在切尔诺贝利事故后,至少有100GW核电装机容量的设计、勘测和建造工作取消了^[3]。切尔诺贝利事故的不利影响到现在还没有完全消除。

在切尔诺贝利事故后,苏联采取了很多安全措施来提高核电站的安全性。对核电站的安全作了进一步的分析。这个分析结果在1986~1989年间用来指导对所有的核电站进行改进的工作,其中包括对VVER型压水堆机组和RBMK型石墨水冷堆机组的改进。经过这些改进后,使它的安全水平达到苏联标准ОПБ—82的要求。对现在所有运行中核电站的工作人员的要求更加严格,要进行专门的培训和考核。核电站的运行规则将修改得更加严格。RBMK型核电机组减少了反应性的正空泡系数和增加了控制棒的插入速度,反应堆的事故保护改进得更加有效。各种改进措施使核电站更加安全了,发生象切尔诺贝利那样大事故的可能性被排除了。

对VVER-1000型核电机组采取的改进措施,使机械事故保护满足可靠性的要求,苏联和经互会成员国的几台VVER-

440型反应堆压力壳已作过退火处理，这样可提高压力壳耐脆化断裂的性能。还为一些核电机组装上了诊断系统，以监测管道和设备的金属状态，以保证反应堆的安全运行。为了提高VVER-440型压水堆机组的安全性，要增加一些安全系统，例如，增加一个在事故期间冷却反应堆的系统，包括增加被动式散热的热交换系统。

由于经济的原因不可能进行现代化改进的核电站，要做出退役计划。

3. 研制的新型机组

自从切尔诺贝利事故后，苏联吸取了核电站运行的经验教训，和很多国家一样，正在研制新的、更加安全、经济的核电机组。新研制的机组是在吸收VVER-440和VVER-1000型的经验教训，并参考其它国家的设计方案的基础上进行的。

在最近几年，苏联研究过多种新型核电机组，压水堆机组就有VVER-88，VVER-91型，VVER-92型及中等容量的B-07型等等。VVER-88型核电机组，前一段时间研究得比较多，准备作为苏联今后建造核电站的主要机型，但由于苏联国内形势的变化等各种原因，这种型号机组的设计已经暂停。所以这种机组的详细情况就不介绍了。

VVER-91型核电机组是列宁格勒设计院与芬兰的IVO公司共同设计的。该设计已完成技术设计，并已申报给芬兰核安全当局进行核安全审评，而且在苏联（俄罗斯）也正在作申报的准备工作。

VVER-91型核电机组的核岛部分采用V-392型反应堆系统。这种型号是在以前的VVER-1000，V-320型的基础上改进后的一个新型号。它主要在核安全性和可靠性方面得到进