

# 秦山三期(重水堆)核电站工程建设和重大技术创新

中核集团秦山第三核电有限公司

(中核集团秦山第三核电有限公司, 浙江海盐 314300)

[摘要] 秦山三期重水堆核电站是我国首座商用重水堆核电站,也是中国和加拿大两国政府间迄今最大的贸易项目。业主秦山第三核电有限公司在工程建设、调试及自主运行的过程中,坚持自主创新管理,有效实施工程质量、进度和投资三大控制;并在消化吸收 CANDU-6 技术的基础上进行改进,提高机组的安全性和可靠性。工程的建设实践,使我国核电工程管理的已有基础上,基本实现了程序化、信息化的规范管理并与国际接轨。工程建成后,在保证机组安全稳定运行的基础上又进行了多项技术改进和创新,使机组性能持续提高。在人才培养方面,注重培育企业文化,强化人员培训,建立起员工培训与工程建设互相促进的良性循环机制。秦山三期工程在核电项目管理水平的提高和发展,可为推动我国核电发展和大型引进工程的规范化管理提供借鉴。

[关键词] 秦山三期重水堆; 核电站; 工程建设; 技术创新

[中图分类号] TM623 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)03-0073-14

## 1 前言

秦山三期(重水堆)核电站工程(以下简称秦山三期工程)是国家“九五”期间重点建设项目,是我国首座商用重水堆核电站,也是中国和加拿大两国政府间迄今最大的贸易项目。重水堆核电站技术成熟的,它有很多特色,尤其是以天然铀为燃料,可以减少对分离功的需求。引进重水堆核电站主要是引进先进的核电技术与管理,博采众长,促进核电发展,特别是重水堆适合生产<sup>60</sup>Co等同位素,这对建设军民结合的我国核工业有着重要意义。

秦山三期工程两台机组顺利建设,并以其建设周期短、工程质量优良、多项施工记录创同类核电站建设之最,而受到国内外好评。两台机组投产后,秦山第三核电有限公司在保证机组安全稳定运行的基础上又进行了多项技术改进和创新,使机组性能持续提高。

秦山三期工程的建设实践,使我国核电工程管理的已有基础上,基本实现了程序化、信息化的规

范管理并与国际接轨。继秦山一期核电站成功实现零突破、秦山二期核电站国产化新跨越之后,秦山三期工程在核电项目管理水平的提高和发展,可为推动我国核电发展和大型引进工程的规范化管理提供借鉴。

## 2 工程概况

秦山三期工程采用成熟的加拿大 CANDU-6 重水堆核电技术,以韩国月城 3 号、4 号机组为参考电站,按合同建设 2 台 700 MW 级核电机组。工程主要指标:

反应堆 CANDU-6 型,水平压力管式重水堆;  
机组额定功率 728 MW;  
核电站设计寿命 40 a;  
设计平均容量因子 85 %;  
首台机组建设工期 55 个月。

工程由中国核工业集团公司、中国电力投资集团公司、浙江省电力开发公司、申能股份有限公司、江苏省国信资产管理集团有限公司共同出资建设。

[收稿日期] 2006-06-20;修回日期 2006-12-02

秦山第三核电有限公司(以下简称秦山三核)作为业主单位,负责核电厂的厂址条件、常规岛及电站配套工程(以下简称 BOP)的施工管理、调试的实施、生产准备和运营,同时受中国核工业集团公司的授权,代表中方负责工程的建设和管理。总承包商是加拿大原子能有限公司(AECL),主要负责核岛(NSP)的设计、供货和全面工程管理;美国柏克德(Bechtel)公司和日本日立(HITACHI)公司组成 BOP 联合体负责分包常规岛和电站配套设施的设计与供货。中国核工业建设集团华兴公司和二三公司承担核岛的土建和安装,中国核工业建设集团二二公司和浙江火电安装公司承担 BOP 的土建和安装。

1998 年 6 月 8 日,一号机组核岛反应堆厂房底板浇灌第一罐混凝土,工程正式开工建设。2002 年 12 月 31 日,一号机组比主合同规定提前 43 d 投入商业运行。2003 年 7 月 24 日,二号机组比主合同规定提前 112 d 投入商业运行。2005 年 9 月 22 日,秦山三期工程通过国家最终竣工验收。至此,工程全面建成。

根据国内已有的多年压水堆设计、建造和运行管理经验,秦山三核在合同谈判、工程建设中深入学习 CANDU-6 核电技术,在消化吸收 CANDU-6 技术的基础上进行改进、创新,使在中国建造的第一座重水堆核电站能够满足中国核安全法规的要求,适应秦山地区厂址特征,进一步提高了电站的安全性和可靠性,电站总体性能达到国际同类型核电站的先进水平,是世界上第一个设计寿命达到 40 a 的重水堆核电站。

在工程建设中,秦山三核始终紧握主动权和控制权,有效实现质量、进度和投资三大控制。工程建设安装质量优良,2 台机组提前投入商业运行,创造了世界重水堆核电站建设周期最短的好成绩。工程造价较国家批准概算投资节约 10.6%。

机组调试、试运行、运行和大修期间,迅速吸收和掌握 CANDU 技术,机组各项性能指标均达到设计要求,并持续改进,改善了机组性能,机组连续 4 a 安全可靠运行,运行业绩显著。电站的建成投产对缓解华东电力紧缺局面发挥了重要作用,取得了显著的经济效益和社会效益。

国家最终竣工验收委员会认为,秦山三期(重水堆)核电站工程的各项指标满足设计要求,工程质量优良,运行安全可靠,经济效益良好。

至今秦山三期工程的 2 台机组已各自经历过 2 次大修,运行业绩良好,2006 年一号机组 10 项指标优于或等于 2005 年 WANO 中值,9 项指标达到 WANO 先进值;二号机组 10 项指标优于或等于 2005 年 WANO 中值,8 项指标达到 WANO 先进值。

### 3 工程建设的主要特色和管理创新

#### 3.1 工程建设的主要特色

##### 3.1.1 不是简单复制参考电站,而是在消化吸收基础上的再改进和再创新

秦山三期工程虽然是引进项目,但秦山三核从一开始就明确了项目的目标,不是单纯复制参考电站,而是要建设世界上最好的 CANDU-6 型核电站,并力求通过工程实践掌握重水堆核电技术。为此制定了如下原则:

1) 必须满足中国核安全和环境影响法规和标准的要求,并适合秦山三期厂址特征;

2) 根据 CANDU 机组的运行经验反馈,进行必要的设计改进,使电站的各系统和整体功能、质量和性能不低于参考电站;

3) 尽可能应用出口国最新的已经成熟的技术以及我国压水堆已经积累的经验,提高电站的安全性和可靠性;

4) 在建设过程中,尽可能采用国际核行业已经成熟的施工新技术。

按照上述原则,秦山三核组织力量迅速消化吸收 CANDU-6 技术,对加拿大与中国的核安全和环境保护法规之间不一致之处进行协调,并进行必要的设计改进,进一步提高核电站的安全性和可靠性,使总体性能达到了国际同类核电站的先进水平。在建安施工过程中,也实施了多项设计改进,有效地应用了一些新工艺和新设备,在保证工程质量的前提下缩短了工期。

##### 3.1.2 不是完全依赖外商,始终把握工程建设的主动权和控制权

秦山三核从一开始就明确不能完全依赖外商进行工程管理,而是要积极主动介入工程建设,把握工程建设的主动权和控制权,行使业主的权利,确保对外方总承包商实施有效的监督管理,以确保工程建设的顺利进行。

为此,秦山三核在主合同谈判中明确了业主对整个工程项目管理的监督权和控制权,为业主在项目管理中的监控提供了法律依据,从而确保秦山三

核在设计审查、设备质量监造、工程质量和计划进度的监督以及工程投资管理等方面有充分的控制权。在工程建设过程中,秦山三核采取有力措施,正确行使了合同赋予的各种权力,在设计审查方面,坚持中国管理当局的法规和标准,处理了多项设计改进,提高了机组的安全性和可靠性;在设备监造中,对严重不符合质量要求的情况及时发出停工令,对重大不符合项及时发出指令进行纠正,有效确保了工程质量;在工程建设方面,与外方合作实施了多项施工新技术,也提出并处理了多项施工方案改进;在调试过程中,也实施了多项技术改进。这些为保证工程质量,提前投入商业运行和接产后就能够自主运行和自主维修打下了坚实的基础。

### 3.1.3 高起点搭建信息化管理平台,工程项目管理与国际接轨

秦山三期工程采用国际上先进的科学管理工具和软件,以高起点搭建计算机信息网络平台,总承包商和各分包商的计算机系统均实现联网,为应用现代化管理技术、采用国际先进管理软件打下了基础。在工程进度、文件与图纸、材料、电缆接线数据等方面均采用了先进的计算机系统辅助管理,使项目管理水平上了台阶。主合同监控、财务管理、人力资源管理等均实现了计算机化管理。公司内部的指令、通知、文件、材料等均通过内部邮件系统传递,大大提高了工作效率,并成为公司正常运转必不可少的组成部分。

以下四项工程管理控制软件和数据库的应用,对工程管理水平的提升起到了至关重要的作用。

一体化进度管理 P3 软件的应用,有效实现了工程进度动态管理,将工程每项活动与其所需要的资源(人力、设备材料、施工机具和费用支付等)链接起来,及时反映计划与实际进展的动态情况,计算关键路径,提前分析出工程中的瓶颈,大大提高了计划的有效性。

物流管理方面,通过工程物流管理系统(CMMS),对总重达两万多吨的钢结构可以控制到每一根的流向,并能预告各类设备能否按计划如期运抵工地,及时发放到安装、调试现场。

在综合布线方面,集成电气与控制数据库(In-TEC)对现场近三万条电缆、数十万个接头给出了信息齐全的编号,不但利于安装、调试,而且为将来的运行、检修提供方便。

文件图纸管理及流转控制系统(AIM/TRAK),在重水堆建造的历史上,首次实现工程中所有文档的全电子化管理和控制,大大提高了查阅速度和流转控制效率,成为国内电子文档管理的先进样板。

秦山三核还自主开发了电站实时数据管理系统(PI)、电站工作管理系统(WMS)和电站核材料跟踪管理系统(NMMS)等软件;PI使各级管理人员在自己办公电脑上就能实现对电站工艺系统运行状态的监督;WMS可对电站所有缺陷和预防性维修工作进行全面管理;NMMS在国内核电站第一次实现了利用计算机对每一根燃料棒束从入厂、储存、入堆、出堆以及乏燃料转移进行全过程跟踪控制。目前正在自主开发集成生产管理系统平台(TEAM),将电站生产管理各领域的活动集成在一个大型平台上,逐步实现电站运行管理的全面信息化。

通过信息化平台积累的工程、调试和试运行数据为电站自主运行、自主维修提供了宝贵资料。

## 3.2 创新项目管理,推进工程建设

引进核电站的项目管理在工程建设中十分重要,秦山三核始终注意在不减轻外方总承包商责任的前提下,业主要有充分的控制权,不仅要积极介入工程管理,确保三大控制顺利实现,还要尽可能深度介入设计、设备制造和工程建造等技术领域,消化吸收技术,培养一支能自主运行和维修的高素质员工队伍。

### 3.2.1 坚持自主原则

创新合作模式 在大型引进项目中,常常容易出现一切依赖外方的倾向,业主往往是处于学习、逐步掌握直至接产运行和进行通用的工程质量监督的弱势地位。尽管对重水堆核电站不熟悉,但已经有了自主设计、建造和运行管理压水堆核电站的经验,因此秦山三核从一开始就十分重视探索与寻找一种适合这种实际情况的合作模式。

主合同是大型核电引进项目中明确中外双方权责的法律文件。秦山三核在项目的准备阶段抽调了精干的队伍在技术和合同条款两方面进行了充分的准备,在合同中落实了具有可操作性的权力;在项目管理条款中,明确规定总承包商必须向业主按时提供月度项目进展报告和质量趋势报告,业主有权进入承包商的项目管理系统查阅工程相关资料等,确保了业主对整个项目管理的实时知情权;明确规定了一系列的工程管理例会制度,确保了业主对工程

管理的介入权;在设计与设计审查条款中,明确了业主对工程概念设计和详细设计的审查权;在质量控制条款中,明确了业主对核岛和常规岛安全重要设备供货商的资格审查和设备制造质量监督权;在质量保证条款中,明确了必须以遵守中国核安全局颁布的质量保证法规和导则为准,确保了业主在整个项目质保体系中的控制权;在项目管理的业主监督中还明确规定了业主有权在发生质量要求严重偏离合同的情况下对工作受影响区域发出停工令,确保业主对重大问题的处置权等。这些规定从法律上保证了业主对整个工程项目的监督和控制权,又由于这些规定十分明确,便于操作。业主在项目执行中认真合理地行使了这些权力,对于秦山三期工程的成功建设发挥了十分关键的作用。

鉴于中方已有比较丰富的核电站建设和管理经验,秦山三核采取了与外方积极合作的态度,充分利用中方的优势资源,在力所能及的条件下勇于承担工程责任,降低工程造价,使中方管理和技术人员在深度介入工程建设的具体实践中得到锻炼。例如,在主合同中业主承诺直接负责 BOP 部分的建造管理,在外方提供相关工程设计资料和实施工程一级和二级进度控制并给予中方一定支持的条件下,中方实施 BOP 工程的施工管理。这不仅使外方项目管理人员大幅减少,节省了费用支出,而且可以充分发挥熟悉厂址条件的优势和利用已有的压水堆核电站的建设经验,实施施工方案改进,尽可能节省工程投资,加快工程进度。还承担了核电站的调试实施工作,在不减轻外方调试技术责任的前提下,中方利用自己的队伍实施调试工作。这样的合作模式,没有改变外方作为总承包商对项目的设计、设备供货、建造和调试负总体责任,尽可能发挥了业主的作用,对双方共同完成电站建造、调试、业主顺利接产和自主运行都是有利的。

### 3.2.2 采用双签模式,创新建安管理

秦山三期工程的建安合同采用了特有的业主与总承包商双签的模式,即 NSP 工程的建安分包合同由 AECL/TQNPC 和中方建造承包商签订,AECL 作为主签,业主作为副签;BOP 工程的建安分包合同由 TQNPC/AECL 和中方建造承包商签订,业主作为主签,AECL 作为副签。

这种双签模式是在不减轻外方总承包商对中方承包商负责技术管理、进度控制和质量监督责任的条件下,由业主负责所有建造合同的价格谈判,负责

合同价格的支付和支付控制,从而充分利用国内资源和已有的建设经验,大幅度降低了工程造价,直接有效地控制了核电站的建造价格。

正是由于这种模式的三方关系使业主参与面广、介入程度深、处于工程控制的有利位置。在外方对中方承包商严格质量管理(如下达停工令时),业主予以支持,要求中方承包商认真进行改进;在外方打算采取强硬措施(如更换某个承包商),可能对工程进度造成严重影响时,业主可以开展协调工作,采取必要措施提升中方承包商的管理能力,如充分利用国内资源来帮助中方承包商改进技术管理或计划管理水平,达到外方的管理要求,从而保证工程质量和进度。这种方式既充分发挥了外方成熟的管理经验,又使中方各参建单位能及时吸收外方核电建设和管理的经验,提升了国内的核电项目管理水平和建设水平。

### 3.2.3 自主设计审查,创新设计管理

设计是工程的龙头,加强设计管理和审查是确保电站设计满足我国核安全法规要求,保证机组性能不低于参考电站水平的关键环节。秦山三核认真落实合同赋予的设计审查权,主合同生效后即组建了由公司总工程师领导,集本公司多专业、老中青结合的精兵强将和技术后援单位专家的强有力的设计审查队伍,兼设计审查、安全审评、环境影响评价报告以及建造许可证和首次装料批准书申请等工作于一身,组织管理顺畅,设计管理工作统筹兼顾,环环相扣,工作效率很高。

设计审查从电站性能、主要参数、各系统的配置、功能、设备性能、数量、设计规范与标准等对外方的设计进行严格的审查监督,确保设计符合合同规定,并满足中国核安全法规和标准的要求。这种比较全面详细的设计审查可看作是由业主和技术后援单位联合进行了一次预先安全评审,在某种程度上也可以认为是一种“独立验证”。队伍通过设计审查进一步熟悉了 CANDU-6 机组的设计,在总工程师的领导下逐步形成了工程建设期间的技术中心,年轻技术人员经锻炼成长,成为技术骨干,并在调试中发挥了重要作用。技术后援单位的专家也在此过程中熟悉掌握了工艺系统和电站的整体性能,培养出一支技术后援队伍,可为将来秦山三期 CANDU 机组的运行提供长期的技术服务。

### 3.2.4 强化设备监造,创新设备质量管理

设备监造是确保设备质量的重要环节,对电站

安全和性能尤为重要。秦山三期核电站设备由加拿大公司承包,由美国和日本公司部分分包,业主对设备实施监造存在一定难度。

为了确保设备质量,业主重点抓好主要承包商的选择工作,要求关键设备制造商资格必须由业主认可,选择分包商也是经业主同意,并千方百计介入监造,通过与外方谈判,将合同规定的核岛和常规岛主要设备监督范围由 40 项扩大到 200 多项。在加拿大设立代表处,在日本和韩国设立设备质量监督小组,采用质量计划(即 ITP)定点的方法,派遣有经验人员驻厂监督和见证装卸料机、排管容器、蒸汽发生器、汽轮发电机、主泵等重要设备制造过程的重要节点。对监造活动中发现的设备质量问题,则依据设备技术规格书和相关标准与外方交涉,坚持原则,有理有节地处理发现的问题。

秦山三核在设备监造中共进行了 533 次监督检查,处理 14 起较大的设备加工质量偏离标准的问题,把住了质量关。秦山三期工程仅单件 50 t 以上的大型设备有 140 多件,没有一件不合格产品用到工程上。中方人员在设备监督中进一步熟悉了重水堆核电站的设计和性能,为调试和运行创造了条件。

### 3.2.5 以系统工程师为核心,创新调试管理

秦山三核采用以系统工程师为技术核心的调试管理模式。将电站按系统划分,由系统工程师对所辖系统全面负责,避免了专业接口之间职责不清、互相推卸责任的现象。

系统工程师制将电站所有系统的管理责任落实到人,实现与安装工作的无缝对接;系统工程师在调试后从事电站技术管理工作,从而在管理上、在技术上、在经验上都保证了系统工程师队伍能够作为一支掌握电站技术核心的技术力量,实现从调试到自主运行的平稳过渡,实现调试向生产的无缝对接。

系统工程师体制的基础是程序化运作,所有的工作都强调以文件为基础。系统工程师通过发布技术文件,规划和指导试验活动的进展。事前有文件,事后有记录,程序编制者与现场执行者相互独立,互相监督,互相协作,确保了试验活动的高质量完成。每一步活动,都以计划为指导,文件为基础,监督为保证,记录为依据。

系统工程师及时对调试结果和调试记录进行整理和分析,并按要求在调试各个阶段编制系统调试进展报告,调试结束后按要求对调试过程中产生的

技术文件进行归档。大量完整的调试数据积累和记录为长期生产运行打下良好的基础。分阶段的系统调试进展报告,也使得核安全监督检查工作能高效进行。

以系统工程师为技术核心的调试管理模式使技术核心人员从调试开始即介入了电站的各项工作,人员得到了较为充分的锻炼。以系统工程师为主体的调试技术部门过渡为机组保驾护航的技术支持部门,负责机组维修技术支持,系统改造以及中长期技术问题管理,而调试执行部门则过渡为维修与运行部门,负责机组的维修与运行,从而为以后自主运行打下了坚实的基础。

## 4 重大技术改进与效果

虽然秦山三期工程采用成熟的 CANDU-6 技术进行设计和建造,但秦山三核从主合同谈判开始就明确不能完全按参考电站进行简单的翻版建设,而是要根据世界核电技术发展的趋势和 CANDU-6 核电站的运行经验反馈,参照我国已掌握的压水堆的成功经验,对提高机组的性能给予充分的考虑,促进必要的可行的技术改进,提高机组的安全性和可靠性。在工程合同谈判和建设阶段共促成了 99 项设计变更,包括 52 项技术改进,其中 21 项为第一次在 CANDU-6 机组中使用,使秦山三期工程的设计达到国际先进水平。在施工设计与方案审查中,促成了 11 项比较重大的施工方案改进,并在施工过程中,采用了一些施工新技术,既保证了工程质量,又缩短了施工工期,还节约了大量投资。调试过程中,仍积极推动调试技术改进,为机组安全稳定运行打下坚实基础。

### 4.1 优化主控室的功能和人因工程的改进

CANDU-6 型重水堆核电厂自 20 世纪 70 年代末定型以来,有些功能已不能满足人因工程需要。在秦山三期工程开始前,AECL 已经开发了 CANDU-9 (900 MW 级)的概念设计,并主动建议采用 CANDU-9 技术在主控室增加电厂显示系统(PDS)、采用 254 cm (100 in) 大屏幕显示和新设计的报警系统(采用自动将状态信息和越限报警分开,抑制无实际意义的报警信号,并按核安全和运行安全的重要性自动按序排列)。在不增加工程费用的前提下采用了这一新技术,还提出如下改进:

增设关键安全参数系统,使核电厂的关键安全参数按重要性,即反应堆反应性控制、堆芯冷却和热

传输系统的热导出、堆芯冷却系统的完整性、放射性监测和安全壳的完整性,集中、分层次显示,便于操作人员迅速评估在正常运行、瞬态、事故工况及事故后的电厂安全状态;在事故时能以最快的速度找到相关参数,分析判断事故的原因。这在 CANDU 核电厂中是首次设计。

吸取美国三哩岛事故的教训,增设技术支持中心,在事故情况下可为有关专家为主控室操作人员提供技术支持提供了场所,为与应急指挥中心和环境监控的连接提供了接口,也为应急演习的技术支持人员提供了场所。

将历史数据储存时间从原设计 6 min 增加到 24 h。在调试运行期间,秦山三核又进一步开发,使历史数据储存时间进一步延长,并连接到公司局域网上,可以查询前一天的运行参数,为数据查询和事故分析提供了进一步的支持。

通过上述改进,改善了主控室功能和人因工程,主控室操作人员反映很好。

#### 4.2 热传输支管材料改进

1995—1996 年,加拿大 G-2 和 Point Lepreau 电站(均为 CANDU-6 机组)发现热传输支管的腐蚀速率超过了设计预计值,不能满足 30 a 设计寿命的要求。1996 年,Point Lepreau 电站发生了热传输出口支管破裂的重水泄漏事件。因这个问题使秦山三期工程 40 a 设计寿命不能得到满足,业主对此十分重视。

经过谈判,外方提出将管材 SA106B 级碳钢的含铬量从原先的约 0.02 wt% 提高到 (0.2 ~ 0.4) wt%,并承诺通过工程性验证试验来验证材料改进能保证设计寿命 40 a。秦山三核对试验过程进行了严格的审查和控制。试验的主要结果:从  $W(\text{Cr}) = 0.013\%$  增大到  $W(\text{Cr}) = 0.24\%$  后, FAC 腐蚀率减小大约 60%,使用寿命延长到 58 a ( $\phi 50.8$  mm 管)和 67 a ( $\phi 76.2$  mm 管)。热传输支管壁厚实际测量结果比设计值大 0.15 mm,材料的含铬量为 0.33 wt%,大于试验用的 0.24 wt%,这又增加了适当的安全裕度,可以满足设计寿命 40 a 的要求。

这项新设计在 CANDU 反应堆中是首次使用。在秦山三期工程之后建设的 CANDU-6 核电机组,如罗马尼亚的 Cemavoda 2 号核电机组就采用了这一设计方案。

#### 4.3 放射性废液处理系统工艺改进

我国对秦山地区核定的放射性废液排放浓度是

$\leq 1 \times 10^{-8}$  Ci/l,而加拿大 CANDU 反应堆的排放浓度是  $2.1 \times 10^{-6}$  Ci/l,高了 210 倍。如果按 AECL 原来的废液处理设计,而又要达到秦山地区的浓度排放标准,为处理废液而产生的废树脂量将增加 100 倍。

经过中方分析,低放废水树脂床失效快的原因主要是废水的总溶解固体(TDS)太高,而 TDS 高的主要原因是去污水中的生活水的盐份含量高。因此要求 AECL 将放射性去污水由生活水和除盐水混合使用改为全部使用除盐水,并在反应堆厂房(R/B)和辅助厂房(S/B)增设有关低放废液系统的取样点,做到废水严格分类、分别收集。

改进后,放射性废树脂的产生量大大减少。这种设计在 CANDU 核电厂中是首次使用。

#### 4.4 CANDU-6 机组技术规格书和源项报告的开发编写

##### 4.4.1 CANDU-6 机组技术规格书的编写

在加拿大 CANDU 核电机组的运行实践中,电站采用“运行政策和原则”(Operating policies and philosophies, OP&P)作为电站最高层次的技术文件,若在运行过程中出现“运行政策和原则”未规定的或与其不一致的工况时,有的需要核安全当局的现场代表审定,有的需要核电厂总经理审定。随意性比较强,时间仓促的修改容易考虑不周,存在一定的安全隐患,而且也不符合中国核安全法规的要求。经过 2 a 多中外双方的不懈努力,开发的运行技术规格书通过了国家核安全当局的批准,成为世界上重水堆核电厂第一次完整使用先进格式、内容和要求的运行技术规格书。国家核安全局对于这项成果给予很高的评价。已有国外 CANDU-6 核电厂主动要求和秦山三核交流、借鉴秦山三核的运行技术规格书。

##### 4.4.2 CANDU-6 源项报告的开发

AECL 从未进行过 CANDU-6 机组的放射性源项研究。为满足秦山三期工程环境影响评价和制定流出物排放管理目标值的需要,秦山三核在合同中就要求 AECL 开展正常运行工况下 CANDU-6 机组放射性源项的研究工作,以满足中国环境保护法规和标准的要求。根据中方专家提出的评审意见,AECL 专家对源项报告先后 8 次改版,使报告不断完善。正如 AECL 专家在报告前言中所说:“在过去,AECL 依赖于 CANDU-6 电站所报告的放射性释放测量值,这些测量数据反映了电站已达到的性

能,而不是一种理论值”。秦山三期工程的源项报告考虑了过去 CANDU-6 电站的性能并按照秦山重水堆核电厂所作的设计改进进行了某些调整,因此用源项报告所提供的数据能更好地预测这 2 台机组将来的性能。

#### 4.5 重要施工方案改进

在秦山三期工程施工过程中,先后实施了十多项施工设计改进,并注重引进和开发新技术、新设备,成功应用于工程实践,对整个工程的质量控制、进度控制和投资控制做出了重要贡献。

##### 4.5.1 反应堆安全壳筒墙结构滑模施工工艺

与以往建造压水堆安全壳筒墙时采用大模板技术不同,秦山三期工程反应堆安全壳筒墙结构的施工采用先进的滑模工艺,模板连续液压顶升,快速优质完成了安全壳筒体混凝土浇注施工,并创造了 14 d+4 h 的同类核电站建造史上的最好记录。安全壳筒墙滑模施工取得了圆满的成功,混凝土质量和筒墙垂直度完全符合设计要求。经过对安全壳整体性压力试验验证,2 个机组安全壳筒墙的结构强度试验和气密性试验均满足设计要求,其中二号机组的安全壳气密性试验的泄漏率仅为 0.132% 反应堆容积/d(设计指标:0.5% 反应堆容积/d),是国际上同类电站中最好的。

##### 4.5.2 海上多功能移动工作平台在取水口工程上的应用

取水口共有 4 条取水涵管,均为水下钢筋混凝土构筑物。施工工程位于钱塘江出海处,自然条件非常恶劣,给施工带来很大的困难。经研究后,采取海上多功能移动工作平台的施工方案。海上多功能移动工作平台是一种新型的方型框架式四桩腿液压自升式平台,该平台具有水下钻爆、水下构件安装、水下混凝土浇筑、海上定位等多项功能,它可以适应 5 m/s 水流的恶劣环境,水深 26 m 时仍可施工,其技术特性在国内尚无报道,在国内核电站也是首次使用,海上多功能移动工作平台在取水口工程上的使用,克服了恶劣自然条件带来的种种不利因素,确保了工程的顺利完成并满足质量要求。

##### 4.5.3 采用开顶式吊装法安装反应堆厂房重型设备

反应堆厂房 CANDU-6 重水堆核电站反应堆厂房中 30 t 以上的主要工艺设备有 18 余台,共计 1 657 t。如果它们不能迅速就位,必将在拥挤的反应堆厂房内占用大量空间而妨碍其他专业施工。经中外双方共同协商,利用现场已有 800 t 吊车的条

件,采用反应堆厂房开顶式吊装工艺,即在厂房封顶之前,将蒸汽发生器等大型设备从厂房顶部直接吊装就位。这种施工方法改变了反应堆厂房主设备的引入核安装必须在穹顶封顶后才开始的传统工艺,有效利用了土建安装施工的交错期,缩短了主设备的安装工期,为整个工程项目的提前完成奠定了良好基础。开顶式吊装工艺在我国核电站建设中是首次采用,在世界 CANDU-6 重水堆核电站施工中也是首开先河。

##### 4.5.4 工厂化管道(模块化)预制

在 CANDU-6 重水堆核电站安装工程中,管道安装工程量占有很大的比例,管道工程安装的进展以及安装质量的好坏,将直接影响整个核电建设工程的建设工期和工程质量。秦山三期工程工厂化管道预制的工艺流程改变了过去由一个班组完成所有工序作业的生产模式,将管道施工中的各道工序细化为若干个独立的工序,由专门的作业小组来完成。采用这种工厂化的流水作业,能充分合理地利用有限的资源,缩短施工工期,提高生产效率,为工程顺利进展创造了条件。

##### 4.5.5 海水泵房土石方开挖及大围堰施工方案改进

大围堰是外方设计的水工构筑物,在概念设计中大围堰长约 110 m,宽 6 m,顶部高程 +7.2 m,底部穿过 4 条海水引水方涵,其作用是使海水泵房的开挖和施工在无水条件下进行。在施工设计审查时发现,如果按照原设计进行施工,一是延误其他建筑物的工期,二是对其他已开挖的场地造成海水淹没的潜在风险。经协商后提出在原设计大围堰的位置先施工一条小围堰(宽 2.5 m,高程 +5.5 m),以此作为今后大围堰的组成部分,将水下施工改为干施工,原预埋的预制涵管改为现浇,保证了工期和其他建筑物场地顺利开挖,也保证了施工安全。该方案使施工进度大大提前,还节约投资  $110 \times 10^4$  USD 以上。

##### 4.5.6 排水口工程施工方案改进

排水口工程分为两部分,即集水井构筑物和排水涵管。排水涵管外型尺寸为 5.5 m×5.5 m,内孔 4.1 m×4.1 m,管道内壁底标高为 77.3 m(相当于黄海高程 -10.7 m)。外方在概念设计中排水涵管伸入海中 120 m,伸入海水深处的涵管处于厚度超过 10 m 的淤泥质海涂中。该方案的缺点是未对如何确保涵管的稳定性和可靠性提出解决办法。中方专家根据本地区已建核电站同类项目的经验,经过

分析研究提出将排水涵管缩短到 15.6 m,取消外伸入海的管段,这样既可避免在淤泥下施工,又使涵管安全可靠座落在基岩上,并进行了物模试验,试验结果表明短管道排水不仅可行而且有利。该项施工方案的改进,不仅可节约工期和投资,更重要的是保证了电站运行期间排水涵管的安全使用。

#### 4.6 提高安全性的设计改进

秦山三核在合同谈判、设计审查和安全评审中十分注重安全问题,一旦发现不能完全满足中国法规和标准的安全问题,就坚持要求 AECL 进行改进,提高电厂的安全性。

##### 4.6.1 增加抗震要求的改进

第二控制区的加热、冷却和空调系统增加抗震设计要求,系统中的空调单元、电加热器单元、所有手动风门以及所有加热风门和房屋顶盖按照抗震设计,级别为设计基准地震(DBE)中的“A”类,以保证事故工况下的可居留性。

将反应堆厂房中原设计 U 型布置的消防水管线改为环型布置,并在原有向反应堆厂房供水的消防水管道外,增加一条从消防水池到反应堆厂房抗震的进水管线,形成 2 条从水池到反应堆厂房的供水管线,既满足中国法规的冗余要求,又满足抗震要求。

秦山三核还提出在地震情况下,安全壳内安全级的就地空气冷却器 LAC 1-16 应直接由应急电源 EPS 供电的方案,保证了该系统在各种事故工况下的安全设计要求。

##### 4.6.2 改进废树脂储存箱设计

参考电站废树脂储存槽的设计为在辅助厂房内设置 2 个内表面衬环氧树脂的混凝土储存箱,放射性的废离子交换树脂的储存时间与电厂使用寿命相同。鉴于环氧树脂在使用后期会因为老化产生脆裂,废树脂储存槽内带有的放射性的水就可能通过水泥墙漏入地下水中,从而对环境造成污染,秦山三核要求将内表面衬环氧树脂改成不锈钢覆面,提高废树脂储存箱的安全可靠性,并根据中国环境保护法规的要求,增加废树脂鼓泡松动和废树脂传输管路接口等设计。改进后,可以使长期储存的废树脂松动,防止板结和在需要时将它取出进行处置。该改进是在 CANDU-6 机组上第一次实施。

##### 4.6.3 应急供水系统 PV7 和 PV41 增设冗余阀门

应急供水系统是电站第二组安全系统中的重要安全支持系统,而系统中 PV7 和 PV41 是两个重要

的失气开的常关阀,原设计不符合单一故障准则的冗余要求。秦山三核要求 AECL 做出改进,将应急供水系统原来单设的 PV7 和 PV41 变成双重设置的阀门组合,使该安全重要系统很好地满足了中国法规中有关单一故障准则的设计要求,从而进一步加强了电站对严重事故的防范能力,并在事故工况下更可靠地保障其安全功能。

##### 4.6.4 安全系统电缆桥架防火隔离改进

在原设计中,反应堆厂房内存在部分组一和组二安全支持系统电缆间距有小于 6 m 的情况,这不符合加拿大标准 CAN/CSA - N293 - M87《CANDU 核电厂防火》中 2 组安全支持系统的电缆布置最小应有 6 m 的水平间隔,或有一组必须封闭在耐火极限为 1 h 的防火屏障中的要求。

秦山三核经过综合分析和比较,在组二系统的电缆托盘及配管上加设了防火套,对电缆桥架进行了防火实体隔离。现场施工完成后,使组一、组二安全支持系统的电缆间有了有效的防火隔离屏障,满足了 CANDU 核电厂防火的要求。

##### 4.7 海水系统可靠性和可维修性改进

参考电站处的海水含沙量低,而杭州湾的海水水质浑浊且泥沙含量较大、泥沙冲蚀严重影响着该系统设备运行的可靠性。而且海水系统和循环冷却水系统照抄参考电站的设计,即用连通管将几台泵和相应的管道、阀门并联在一起,因此部分设备不可检修。鉴于海水系统对于电站安全和经济运行的重要性,秦山三核组织技术力量,从调试开始到试运行阶段不断对海水系统实施技术改进。

##### 4.7.1 海水泵房闸板改造

海水通道的闸板由 Bechtel 公司设计,原设计为钢筋混凝土结构,因结构不合理,闸板闸放下后泄漏严重,无法满足系统隔离要求。而且闸板下放、起吊比较困难,存在安全隐患。

秦山三核自主进行了改进,采用整体焊接平面钢闸板,闸板上安装 6 只水下油压千斤顶,对顶面止水、侧面止水橡皮进行压缩,闸板水下安装和起吊采用自动挂脱钩装置,同时采用相应的防海水腐蚀的措施。改进后的钢闸板背水面泄漏很少;钢闸板只有 12 t 重,保证了泵房 32 t 单轨吊能够安全起吊;自动挂脱梁装置投用降低了水下作业风险。运行情况表明,新型钢闸板在先进性和实用性方面都远远优于原闸板,保证了系统的可维修性。

##### 4.7.2 海水泵房实体隔离

海水泵房为 2 台机组共用,每台机组各有凝汽

器冷却水(CCW)泵2台、厂用水(RSW)泵4台。在原设计中,在2个机组之间、各机组RSW泵房与CCW泵房之间各有一道钢筋混凝土隔墙将各泵房分开。但这些隔墙只是从泵房底层延伸到电机层,且低于一般高潮位。如果在海水高潮位时,2台机组中的任何一个泵发生海水大量泄漏事故,则整个海水泵房都有被海水淹没的可能,从而造成2台机组全部停运。

秦山三核从机组安全运行考虑,自主进行了技术改进,在一号机组和二号机组CCW系统间、2台机组RSW和CCW系统间增加了实体隔离墙,在电机层分别构筑3道3.2 m高的实体隔离砬墙。这一技术改进消除了安全隐患,为电站的安全生产和海水泵房的设备安全提供了保障。

#### 4.7.3 增设RSW备用冷却水系统

RSW系统设计为向设备冷却水(RCW)系统提供冷却水,根据重水堆的特点,RSW系统在反应堆停堆后也需连续运行以带走堆芯衰变热,而原设计没有考虑有些设备的隔离检修。

为改进系统的可维修性,秦山三核调研了参考电站的改造情况,决定增设RSW备用系统。采用一根 $\phi 60.96$  cm(24英寸)的管线将CCW泵出口母管和2台RCW热交换器的RSW侧联接起来,当RSW系统需要停役检修时,可从CCW系统引入冷却水,使电站停堆后RSW系统大修时具备导出堆芯余热的能力。项目实施后在机组大修过程中为RSW系统的停役检修创造了条件。

#### 4.7.4 RSW系统二次滤网技术改进

RSW系统为电站的设备冷却水和备用热阱系统,其可靠性直接影响机组的安全运行。为去除海水中的杂物,该系统除设置了旋转滤网外还设置了二次滤网。原二次滤网采用刮板旋转排污、链条传动,在电厂运行初期频繁出现链条脱落、漏水、滤网堵塞、轴套磨损、盘根磨损等故障,降低了系统的可靠性,并大大增加维修的人力和费用。

针对该缺陷,秦山三核自主对二次滤网进行了改进,滤网由链条传动改为由外置电动装置经由密封式齿轮减速箱直接传动,从而直接避免了海水中泥沙对转动装置的侵蚀和磨损。改进后的二次滤网运行性能大大提高,没有再出现上述故障,总体上提高了系统的可靠性。

实践证明,上述改进改善了海水系统的可维修性,有效控制了海水系统设备出现的早期失效问题,

提高了系统的可靠性,为2台机组的安全、经济运行提供了有力的保障。

#### 4.8 水处理厂增设反渗透工艺

根据秦山地区淡水原水的特性:秋冬季节,取水口存在海水倒灌现象,会使原水含盐量急剧增加,如果仅采用离子交换技术进行水处理,只能维持几个小时的用水,很难维持正常运行。

为此,在设计阶段,秦山三核提出水处理厂离子交换器前增加反渗透装置(RO)和超细过滤装置。由于水处理厂采用了这一技术改进,在RO投入的情况下,即使是枯水期,离子交换器的制水量也超过 $2\ 000\text{ m}^3$ ,整个调试和试运行过程的各种需要大量使用除盐水的异常情况都得到了满意的供给。

#### 4.9 物理启动试验的技术改进

按照CANDU堆的实践和惯例,调试试验划分为A、B、C、D 4个阶段,堆物理启动和调试项目主要集中在B阶段的首次临界和低功率物理试验以及C阶段升功率物理和热工调试试验,其中B阶段试验约需4周,C阶段试验约需2个月,存在试验时间长、试验数据准确性差、试验需要反复进行等问题。

秦山三核在调试中以中方技术力量为主,通过自主研究,做出以下改进:试验中在慢化剂中添加的有毒物由硼改为钆,用提升调节棒取代提升机械吸收棒达临界,改进临界预计和外推方法,开发临界预计的计算机辅助程序;改进电离室有效条件下的反应堆启动程序;通过慢化剂泵的仪表管线注入标准硼包,改进液体区域控制装置反应性测量方案;改进和完善通道流量验证技术;开发校正计算程序,改进区域超功率保护探测器的校正方法;开发了用于物理启动和运行的6个计算机数据处理和分析软件。

改进后提高了试验预计的准确性和试验数据的精度,避免重复试验,缩短了调试时间,同时也提高了物理试验操作的安全性。

通过上述多项技术改进,不仅提高了机组的安全性和可靠性,而且使中方人员加快了掌握CANDU核电技术的进程,为自主运行奠定了良好基础。

## 5 自主运行管理 持续改进创新

在工程建设结束后能否顺利接管,实施自主运行管理,是反映秦山三核是否已经消化吸收重水堆核电技术的重要标志。秦山三核从合同谈判开始就十分重视这一问题,并在主合同中规定了机组调试

完毕满功率运行 100 h 后即交付中方,开始自主运行管理的高标准。工程项目建设一开始,秦山三核就统筹安排、细微有序地着手自主营运核电厂的准备。在工程项目建设期实施全面监督控制,利用调试加快培养员工对系统和设备性能的熟悉,以掌握技术;培养人才的同时建立并完善组织机构,逐步建立了一整套科学的文件体系,指导各类生产活动。使工程建设和生产准备两条战线齐头并进,保证了建成即自主运行、建成即自主大修。在自主运行管理过程中,不仅持续改善机组性能,还通过各种方式促进并初步形成了具有核电特色的三核文化,取得了安全生产和经营管理的良好业绩。

### 5.1 实现了调试向生产的平稳过渡

秦山三核按照国家核安全法规和导则的要求,参照国际原子能机构对项目管理的要求,结合实际,开展生产准备工作。公司按照“垂直管理,分级授权”的原则,根据核电站的不同阶段,有计划地设立公司组织机构,并适时调整,保障了生产准备、调试、运营管理的顺利进行。形成了工程建设和生产准备两条并行的战线齐头并进,保证了工程建设的顺利进行。

建设一支高素质的员工队伍对促进各项工作的开展非常重要。工程建设期间,秦山三核抽调了一批具有压水堆生产运行管理经验的技术骨干,带领 1997 年和 1998 年招进的近 300 名大学生,开始了以培训为中心的生产准备工作。技术人员接受的培训包括外语训、核电基础知识培训、CANDU-6 电站系统和设备基础培训(在国内由外国专家授课)、国外参考电厂调试培训(部分技术骨干参加)和国外 CANDU-6 机组运行实践培训等。完成培训后,通过参与设计审查、设备监造、工程质量监督、调试和试运行等活动,技术人员迅速消化吸收并逐步掌握 CANDU-6 重水堆核电技术,组建一支好的职工队伍,为实现调试向生产运行的平稳过渡奠定了良好基础。

为保证自主安全运行电站,秦山三核十分重视电厂管理,从提高执行力到规范管理,从规范管理到精细管理,逐步提高公司的管理水平,并为此建立了一套完整科学的文件体系,以指导各种生产活动,使各项工作程序化、规范化和制度化。

秦山三核文件体系主要包括管理程序和技术程序 2 个层面。管理程序分为 4 个等级和 18 个类别。4 个等级是:0 级 - 国家法规、标准及有关核安全导

则;1 级 - 公司运行质保大纲及最终安全分析报告;2 级 - 电厂政策、电厂指令;3 级 - 执行程序、接口程序、部门程序。18 个类别按工作类型进行分类,分别为行政管理、保卫和消防、培训、质保、运行、化学、核安全、文档、设计管理、燃料管理、检修、采购管理、生产总体、技术总体、信息技术、应急、工业安全、辐射防护。根据工程进度要求,全部管理程序在 1999 年 10 月至 2003 年 5 月之间完成编校审批工作,保证了生产要求,规范了电厂的程序化运作模式。技术程序主要有调试程序、运行程序和维修程序等,对电厂设备、系统操作和试验检查以及对各种异常情况的处理做出详细规定。

秦山三核在生产准备中始终以迅速掌握 CANDU 技术,尽快实施自主运行管理为目标,各项措施正确实施,终于在机组调试完毕满功率运行 100 h 后顺利接产,开始实行自主运行管理,实现了调试向生产的平稳过渡。

### 5.2 具备了自主开展大修的能力

秦山三核从项目开始就明确了自主进行维修的目标。为了完成这项任务,在生产准备阶段制定了《检修准备大纲》,明确了维修体制,确定了“秦山三核自行负责维修管理、机电仪等专业的维修技术准备和控制、日常维修计划和协调,负责检修实施的质量控制,全面负责仪控系统和继电保护的维修,全面负责装换料系统的维修,负责关键电气和机械设备检修,机械、电气通用设备的维修实施以外委为主。”的指导方针。

按照《检修准备大纲》的要求,参考国内外核电站的先进经验,秦山三核按照计划逐步建立了维修管理制度和规程,并通过自主编制检修文件进一步巩固和提高了检修技术人员的理论水平。通过自主开发的工作管理系统、工单系统、工作票系统等维修管理软件,进一步规范检修工作流程,有效的控制检修工作的各个过程。

通过调试检修实践,检修队伍得到进一步的锻炼,提高了自主维修的自信心。到试运行秦山三核已能自主承担电站所有重要、关键设备的检修工作,如:仪控设备检修、主泵机械密封检修、上充泵机械密封检修、装换料机检修等。

机组临时验收后,秦山三核即着手开始首次大修的准备工作。细致的大修准备工作之后,按照大修计划落实大修实施工作,通过及时的现场工作反馈实施计划网络控制,使大修按照计划推进。由于

良好的大修组织和管理,4次机组大修均顺利完成,大修后机组的运行业绩逐年提高,实践证明秦山三核从项目开始就确立自主检修的目标,采取切实有效措施并不断实践,使其真正具备自主大修能力的总体思路是正确的。

### 5.3 形成了可向国际同行推广的良好实践

在调试向运行平稳过渡后的试运行期间,秦山三核及时进行了组织机构、部门责任和管理程序等方面的适当调整,以适合运行阶段的要求。公司还制定了企业发展的五年规划,以跨入世界先进核电站为目标,在核安全文化、人员意识和人员行为等方面采取了一系列措施,提升人员绩效和运行管理水平。

2005年3月,国际原子能机构派遣评审专家对秦山三核进行了为期17d的运行安全评审,评审团对秦山三核的总体评价为“电站有很强的自上而下的安全文化,因为TQNPC有一支年轻而富有经验的,并经过适应期的员工队伍;管理层和员工非常开放,并在评审过程中积极配合评审专家;对口人极其的坦诚和开放,并共同来寻找不足和良好实践。”,各国专家还在评审中选出秦山三核的优势向国际同行电站推荐,例如:

1)建立和完善运行值性能考核指标。为保证机组安全稳定运行,发挥运行倒班值积极性,推行运行倒班值性能指标考核,将考核指标具体化。考核指标包括定期试验和定期切换、工作申请、工作票和设备安措、日常工作质量不符合项、工作失误透明度、团队合作满意度等16项。对运行工作进行量化考核,使得各项的工作量和工作成绩具有可比性。考核项目还根据机组运行情况、人员经验和水平的提高进行调整、优化。运行值性能考核指标已被WANO东京中心作为核电厂运行管理的良好实践向全世界核电运行行业推荐。

2)推行人员绩效提升计划。为强调和强化正确的行为,及时提出和推行人员绩效提升计划,以减少人因失误。计划中将操纵员的工作细分为5个主要方面,每个值每轮对这5个方面的工作有针对性地选取至少2项工作,由值长对这些项目的整个执行过程进行全程跟踪观察,发现其中的缺点,在工作结束后及时总结,这样不仅改善了现场操作人员的运行行为,同时提高值长的技术能力和管理素质。

秦山三核充分利用国际原子能机构进行安全评审的机会,组织员工与具有丰富运行经验的评审专家交流,学习国际核能界的良好实践,开拓视野,找

出差距,明确今后努力的方向,对促进每个领域的工作无疑有巨大的推动作用。

### 5.4 持续技术改进,不断提高运行业绩

针对调试和运行期间机组暴露出来的设计和设备问题,按照我国核安全法规、国家和行业技术标准的要求,本着进一步提高电厂运行安全性和可靠性的目标,秦山三核对设备、系统和构筑物持续进行了技术改进,从而使机组的运行性能得到持续的提高,其中,4项技术的专利申请得到国家知识产权局专利局受理,正在办理授权。

#### 5.4.1 增设停堆系统数据采集功能

反应堆配备有工作原理完全不同的两套独立的停堆系统。两个停堆系统原设计没有数据记录功能,导致在电厂发生异常事件时难以分析判断故障原因所在。另一方面,主控室盘台对部分参数虽有显示,但误差大。

针对以上问题,秦山三核在每个停堆系统配置一套独立的参数监测系统,对停堆系统的数据实现高速采集,方便运行人员对于数据进行监视,而且2个停堆系统的参数监测互不影响,并可实现自我诊断和报警。监测参数在原有的模拟指示表的基础上增加了高精度数字显示,并增加了停堆参数的裕量报警功能。

数据采集系统投入运行后,为操作员提供了更精确的数据显示,改进了电厂的状态监控能力和瞬态分析能力,提高了电厂的安全性和经济性。在重水堆核电站中属于首创。

#### 5.4.2 破损燃料棒束检测定位方法改进

破损燃料棒束定位系统通过测量释放到冷却剂中的裂变产物I-137和Br-87衰变产生的缓发中子数来查找破损燃料棒束所在的燃料通道。在原检测定位方法中,只能查找到破损燃料棒束存在于卸料通道燃料棒束串(4~8个棒束)中,不能确定破损燃料棒束的准确位置,容易发生误判。

秦山三核进行了如下的技术改进:根据燃料通道缓发中子计数的历史趋势来定位破损燃料棒束所在的通道位置;根据乏燃料转移过程中卸料池房间的伽玛剂量变化定位破损燃料棒束。在新开发的破损燃料卸料操作流程中,针对从装换料机每次向卸料池房间卸下一对燃料棒束的情况,可用上述方法可先将破损燃料棒束定位到一对燃料棒束,再从这对怀疑的燃料棒束中找出单根破损燃料棒束,实现了单个燃料棒束的破损定位。

改进的破损燃料棒束检测定位方法能将定位能力提高到可以准确找到单个破损的燃料棒束,在3 a来的实际应用中成果显著,有效地防止了误判的发生。

#### 5.4.3 利用冰塞对系统进行隔离的技术开发和应用

在重水堆核电站的工艺系统中,由于安全或者经济的原因,存在必须对系统进行隔离而该系统的相关部分又无法隔离的情况。例如,由于反应堆内始终装满燃料棒束,主热传输系统必须在任何时候都充满水,无法隔离。在这种情况下,采用冰塞来进行系统隔离是一种行之有效的办法。

秦山三核从2001年起就开始根据冰塞原理进行冰塞技术的开发,并进行了实践和应用,现已具备在 $\phi 6.35 \sim 152.4$  mm管道上制做冰塞的能力。至今,共实施冰塞200余次,根据需要开发了几十种不同用途的冰塞夹具,为电站检修工作创造了条件。

#### 5.4.4 冷却水系统用缓蚀剂的开发和应用

每台机组常规岛部分共有14个冷却水系统,设计方对这些系统的化学控制,只规定了PH值要求,未提供缓蚀剂名称和缓蚀剂浓度范围。2002年,秦山三核根据各系统的材料选型、运行工况、水质特点,通过实验室试验,研发了一种适用于以上冷却水系统的钼系复合缓蚀剂。运行实践表明,所研发的缓蚀剂使常规岛冷却水系统的腐蚀速率大大降低,系统内的总铁和悬浮物指标维持在较低的水平,即使在较高的温度下仍具有良好的缓蚀效果和防腐蚀性能,如以除盐水为介质,85℃条件下,加入该缓蚀剂后,对A106碳钢的腐蚀率仅为0.0014 mm/a,缓蚀率达99.58%,远低于国家标准规定的0.125 mm/a的缓蚀率。

#### 5.4.5 提高机组额定总电功率的研究与改造

秦山三期工程的汽轮机为日立公司生产的TC4F-52型单轴、三缸、四排汽、再热凝汽式冲动型汽轮机,设计担保的机组额定总电功率为728 MW。

机组临时验收时,由于日立公司的原因,汽轮发电机额定总电功率未达到设计担保值(约低1%)。日立公司自2002年到2005年花费了约 $1000 \times 10^4$  USD进行改造,但机组功率没有明显提升。最后,日立公司放弃了进一步的努力。2005年9月,秦山三期重水堆核电站工程通过了国家竣工验收,鉴于上述情况国家竣工验收确定的机组额定总电功率为720 MW。

2006年初,秦山三核针对机组额定总电功率问题成立了重点科技攻关专项组,组织国内的技术力量进行攻关,通过对电站热力系统各参数的研究分析和试验,找出了影响机组额定总电功率的主要因素,制定了相关改造方案,并在202大修中对2号机组进行了改进:优化MSR二级再热蒸汽流量,使机组额定总电功率提高了2.8 MW;回热加热器排空气管线增加调节阀;主蒸汽湿度测量及参数修订,使机组额定总电功率提高了0.8 MW;改造疏水管线,提高机组额定总电功率0.6 MW;汽轮机低压缸隔板中分面和装配面漏气处理,使机组额定总电功率提高1.2 MW。经过性能考核试验,2号机组额定总电功率达到728.01 MW。

除上述改进外,还针对电源系统设计不合理和设备选型不当等问题,对电源系统进行了改进和优化,对辐射防护系统进行改进,提高通风、制冷系统的安全性和可靠性等,进一步优化了系统配置,提高电站的安全性和可靠性。

#### 5.4.6 自主开展 $^{60}\text{Co}$ 同位素生产研究

由于CANDU重水堆的堆芯结构和反应堆物理特性,调节棒运行期间一致插入堆芯,将不锈钢调节棒换成 $^{59}\text{Co}$ 调节棒后, $^{59}\text{Co}$ 在堆内强中子场,接受中子辐照并俘获一个中子后转变成大量的 $^{60}\text{Co}$ 。因此,CANDU重水堆具有生产高比活度的 $^{60}\text{Co}$ 放射源的优势条件,而且可基本不影响电站的正常发电和安全稳定运行。

秦山三核已连同上海核工院开展将不锈钢调节棒换成 $^{59}\text{Co}$ 调节棒后在堆内受照转变成 $^{60}\text{Co}$ 的设计和安全分析工作,并已进行了相应的反应堆改造。其他工作,如靶件和乏燃料水池内的操作设施制造技术也在准备中。

秦山三核计划对钴调节棒组件辐照一个周期(18个月)更换一次,可在计划检修期内完全可以完成,不影响发电时间。2个堆每年可生产工业钴源6M Ci,投入生产后,将改变我国 $^{60}\text{Co}$ 主要依赖进口的现状,可产生巨大的经济和社会效益。

#### 5.4.7 自主开展乏燃料干式储存技术研究

根据设计,每台机组设有一个可存放10 a所产生的乏燃料储存水池。考虑到乏燃料的运出问题,需留有放置操作设备的场地和倒运通道等,经计算此乏燃料储存水池的实际可储存容量不到8 a。

经调研,现场乏燃料干式中间储存是国际上重水堆核电站通用办法。目前,CANDU堆乏燃料干式

储存技术主要有三种形式:安大略电力公司设计的干式混凝土储存罐(简称 DSC),AECL 设计的混凝土筒仓和 MACSTOR 模块。

秦山三核于 2004 年启动该项目,并委托上海核工院对乏燃料临时储存设施的技术方案、选址及其可行性进行分析研究。经专家讨论,秦山三核拟采用 MACSTOR-4 技术方案。该方案与其他两种干式储存方法相比,具有更好的屏蔽和热扩散性能,良好的密封性,节省空间,更少的建造费用等优点。近几年已建成或即将建设的 CANDU 堆乏燃料干式储存设施,如罗马尼亚 Cernavoda 电厂和韩国月城电厂等,均采用此项技术进行乏燃料干式储存。

秦山三核乏燃料干式储存项目进展顺利,目前已编制完成可行性分析报告并向国家核安全局提出建设申请,并开始储存场地的土石方开挖。

秦山三核通过持续的技术改进,取得了一个又一个成果。通过秦山三期工程的建设,尤其是通过调试和自主运行和自主维修的实践,基本掌握了 CANDU 技术,在将来的运行中,还将继续进行持续的技术改进,使机组的各项指标更上一层楼,力争在不久的将来跨入世界核电的先进行列。

## 6 结语

秦山三期工程在引进项目的建设过程中,改善中外合作模式,在合作中不断提高自主建设核电站的能力;始终坚持自主原则和业主对项目的监督权及控制权,依靠我国自己积累的核电工程建设经验,迅速吸收和掌握国际上先进的核电工程管理经验和管理技术;进行管理创新,有效实施工程质量、进度和投资的三大控制,实现工程管理与国际接轨;在消化、吸收 CANDU-6 技术的基础上,采用先进、成熟技术,实施多项技术改进,进一步提高机组的安全性和可靠性,并取得了显著成效。

基于已有的核电项目管理经验,抓住与国外大公司合作的机遇,变革管理理念,创新管理手段和方法,成功建立了有效实施工程三大控制的与国际接轨的管理体系,提升了核电项目管理水平。通过秦山三期中加合作,中核集团建起了一套从合同谈判

开始,直至建造、调试、运行、燃料制造等一套完整的体系,培养了一批国际核电工程建设和管理队伍,加快了生产运行人员的成长。更重要的是培养了一批与国际管理接轨,驾驭掌握核电技术和项目管理能力的专业人才,造就了一支作风好、业务精、肯学习、敢拼搏的核电科技队伍,成为我国核电建设的骨干力量,为新建核电项目提供了宝贵的经验。

秦山三期工程的成功建设为我国核电建设和引进项目的管理积累了宝贵经验,工程建设的成功得到了党和国家领导人的亲切关怀和充分肯定。2005 年国家主席胡锦涛盛赞“中加联合建设的秦山三期核电站取得的巨大成绩,是中加企业合作的成功典范”。加拿大方面评论说秦山三期工程是以中国人为主体的实现的,是中国人成功的故事。秦山三期工程成功探索了中外合作建设核电的管理模式,使我国核电项目管理水平迈上了一个新台阶,是中加两国在核能和平利用领域的成功典范,是两国人民合作与友谊的见证。

机组投入商业运行后,秦山三核在总结经验的基础上,不断进行技术优化和改进,使机组的运行性能得到持续提高,创造更大的经济和社会效益。电站投产后运行业绩显著,自建成以来至 2006 年 12 月,连续三年安全运行,并连续三年盈利,累计发电  $400 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,相当于节约标准煤  $1360 \times 10^4 \text{ t}$ ,大大减少环境压力,经济效益、社会效益和环境效益显著。

秦山三核人在继承中发展,在开拓中前进,传承、发展三核文化,坚持科学发展,坚持自主创新,坚持“两个永远”(永远不要认为自己是最好的,永远将安全放在第一位),坚持安全发电是硬道理,锐意进取,团结拼搏,朝着早日迈入世界核电先进行列的愿景奋进,续写秦山三核的新篇章。

## 参考文献

- [1] 康日新. 秦山三期重水堆核电站建设经验汇编[M]. 北京:原子能出版社, 2003
- [2] 康日新. 秦山三期核电站工程建设实践[M]. 北京:原子能出版社, 2006

# Project Construction and Important Technical Innovation for Qinshan Phase III (PHWR) Nuclear Power Plant

Third Qinshan Nuclear Power Co. Ltd, CNNC

*(Third Qinshan Nuclear Power Co. Ltd, CNNC, Haiyan, Zhejiang 314300, China)*

[ **Abstracts** ] Qinshan Phase III (PHWR) Nuclear Power Plant, the first commercial heavy water reactor nuclear power plant in China, was the biggest trade project performed between the governments of China and Canada. As the owner, the Third Qinshan Nuclear Power Company (TQNPC) persisted in independent innovation management during the project construction, commissioning and self – dependent operation, efficiently realizing the three controls of the project, i. e. quality control, schedule control and investment control, and persisted in technical improvement on the basis of digestion and absorption of CANDU –6 technology to improve the unit safety and reliability. The project construction practice has helped China’s nuclear power project management to become programmed, computerized, standardized and management internationalized on the existing basis. After completion of the project, with unit safe and steady operation as the prerequisite, TQNPC performed several technical modifications and innovations to continuously improve the unit performance. In the area of staff development, TQNPC paid much attention to cultivation of corporate culture, strengthened staff training and built up a good circulating mechanism with staff training and project construction promoting each other. Further to “Zero Breakthrough” and a new step forward of localization successfully realized in Qinshan nuclear power plant and nuclear power qinshan joint venture company, the improvement and developemnt of nuclear power project management level in Qinshan Phase III (PHWR) nuclear power plant provided reference for promotion of nuclear power development in China and standardized management of introducing large imported project.

[ **Key words** ] Qinshan Phase III heavy water reactor; nuclear power plant; project construction; technical innovation