

## 国际综述：核电厂的良好实践

### IAEA 关于某些核电厂取得良好实绩的原因的调研结论简介

F. Calori  
和 J. Dular

近 10 年来,世界各地核电厂实绩不断提高的趋势十分显著。1990 年,总计 231 套核电机组——全世界装机容量大于 100 兆瓦电(MWe)的非原型核电机组总数的近 2/3——达到了相当高的实绩水平。根据 IAEA 动力堆情报系统(PRIS)的统计数字,这些核电机组的能量可利用因子(EAF)达到了 70%至 90%.,其中 33 套核电机组报告的 EAF(机组可用于发电的时间百分率)超过 90%。这些数字说明核工业确实取得了很大的成就。(见第 46 页图。)

但同时也还可以看到,不同营运单位所管理的核电机组之间存在着很大的差异。例如,1990 年有 48 套核电机组报告的 EAF 低于 50%。

为了确定和分析造成这样一些差异的原因,IAEA 开辟了两个涉及许多核电机组的调研项目。\* 这两项调研的范围和性质不同,而且是独立进行的。一项调研一般称为“良好实践”调研,它以一部分实绩突出的核电厂为对象,数量不多。另一项调研(本文称为 OSART 调研)是 IAEA 运行安全检查组(OSART)计划的副产品。OSART 计划的内容是,国际专家应各国主管部门邀请对其核电厂进行现场检查,以评定保障运行安全的那些实践是否恰当。

本文将评述这两项调研的主要目的和目标,并概述其主要结论,包括已确认的有

Calori 先生和 Dular 先生是 IAEA 核能与核安全司高级职员。

\* 见 *Good Practices for Improved Nuclear Power Plant Performance*, IAEA TEC-DOC 498, Vienna (1989), and *OSART Good Practices, 1986-89*, IAEA TEC-DOC 605, Vienna(1991)。

助于核电厂取得良好实绩的主要因素。

#### “良好实践”调研

IAEA 的“良好实践”调研始于 80 年代后期,目的是查明世界核电机组实绩之间差别很大的主要原因。

调研的重点是营运单位在审管部门规定要求之外所作的种种努力。这些营运单位一般都力求建立、保持和改善电厂设备的可靠性、工作人员的责任心和业务能力,以及各项工作的计划、执行和监督方法。

这项调研包括访问 7 个国家的 8 座核电厂。机构之所以挑选这些核电厂,是因为它们一贯保持着良好的实绩(主要表现在可利用因子上)。此外,还访问了一些运行保障部门和给多家电力公司提供运行保障服务的三个独立单位。

被访问的核电厂总共有 22 套正在运行的核电机组。在这项调研进行时,它们已积累了约 130 堆年的商业运行经验。这些机组从规模(445—1248 MWe)、堆型(PWR、BWR 和 PHWR)和交付使用年代(1973—1986 年)来看,在世界上具有一定的代表性。IAEA 的选择标准是:

- 有关电力公司积累的核运行经验(10 年以上);
- 正在运行的机组数(两套以上);
- PRIS 记录的能量可利用因子(一直超过世界平均值,并在此项调研开始前至少 2 年是逐步提高的)。

#### OSART 调研

第二项调研(在 OSART 计划名下完成的),是 IAEA 平时进行的核电厂运行安全



日本高滨核电站鸟瞰。

检查工作的副产品。

OSART 工作组在出访过程中，特别注意与被访核电厂的运行安全和实绩有关的良好实践。各工作组从 1986 年开始总结这些实践，并自 1988 年起系统地加以汇编。

OSART 计划本身创立于 1982 年，之后的不断发展则是由于人们认识到核电厂的安全最终取决于运行人员的业务能力和责任心，以及他们所拥有的装备和使用的工作方法。通过 OSART 检查人员与核电厂对应人员的技术交流，一般均能找出并详细讨论存在的问题，然后拟定出可能的解决办法和方案。

OSART 每次出访观察到的具体内容都以技术札记的形式成文。这些札记随后被用作交给东道国政府的 OSART 正式报告的原始材料。札记的内容包括提出的改进建议和值得赞扬的良好实践。OSART 将每次检查过程中发现的良好实践通知被检查的核电厂，并考虑能否应用于其他核电厂。经过整理的这些良好实践分发给负责建造、运行或审管核电厂的所有单位。

关于 OSART 工作组确认的良好实践，有几点必须说清楚。由于某些实践是几年

前首次被确认为良好实践的，因而目前可能已经成为被广泛采用的常规实践。此外，不是所有的美好实践都适用于一切核电厂，因为每次 OSART 检查都是因厂而异的，工作组成员的个人看法也难免带有主观的成分。

#### 有助于取得良好实绩的主要因素

从这两项调研的结果来看，许多运行实践和运行程序确实有助于核电厂取得良好实绩。它们一般与以下几方面有关：

**一般的质量管理原则。**这两项调研确认的那些实践，有的说明管理部门一贯深入实际，有的用于激励工作人员的责任心，有的则用于树立较高的实绩期望值。就卓有成效的管理而言，它应保证做到明确规定所要达到的实绩目标和具体指标，并以此作为制定工作规划和计划、分配合适的资源及向职工下达实绩期望值的依据。实绩的具体指标一般都写入核电厂的政策文件和运行程序，纳入职工的培训和工作计划，在工作开始之前下达给立约者，并由管理人员在日常交往和会议中加以强调。

这个过程的一个重要组成部分是明确

机组	国家(营运者)	堆型	净装机容量, MWe	开始商业运行时间	至 1989 年的累计 EAF	OSART 检查
巴尔塞贝克 1-2	瑞典(SYDKRAFT)	BWR	2×600	1975-1977 年	机组 1: 79.3 2: 84.5	1988 年
皮克林 1-8	加拿大(OH)	PHWR	8×516	1971-1986 年	58.2-89.6*	1987 年
卡尔浮脱悬岩	美国(BGE)	BWR	2×825	1975-1977 年	机组 1: 69.2 2: 74.2	1987 年
菲利普斯堡 1-2	德国(KKP)	PWR	864 1268	1985 年	机组 1: 65.6 2: 88.7	1987 年
阿尔马拉兹 1-2	西班牙(CNAL)	PWR	2×900	1981-1984 年	机组 1: 70.1 2: 81.2	1987 年
高滨 3-4	日本(KEPCO)	PWR	2×830	1985-1985 年	机组 3: 84.0 4: 86.8	1988 年
圣·阿尔邦 1-2	法国(EDF)	PWR	2×1335	1986-1987 年	机组 1: 60.5 2: 68.1	1988 年
波克什-3	匈牙利(MWMT)	WWER	410	1986 年	87.5	1988 年
罗夫诺-3	乌克兰(MAPI)	WWER	950	1987 年	74.4	1988 年
卡努普	巴基斯坦(PAEC)	PHWR	125	1972 年	25.7	1989 年
安格拉	巴西(FURNAS)	PWR	625	1984 年	24.9	1989 年
拜伦 1-2	美国(COMED)	PWR	2×1120	1985-1987 年	机组 1: 69.0 2: 69.1	1989 年

\* 8 套机组的最小值和最大值。

注: EAF=能量可利用因子。此因子是从商业运行后的那个月开始计算的。

来源: IAEA PRIS

### OSART调研涉及的核电机组

规定组织体制和相应的权力与责任。核电厂经理要保证做到在核电厂文件中明确规定各部门各人的职责和相关的接口,并下达给有关职工,使全体职工理解和认可。文件中还应包括本厂职工与公司管理部门和外部运行保障部门的关系。

他们特别注意建立有效的报告机制,

使这些机制能确保通过值长报告、事件报告或调度电话系统,将重要事项或或监查结果迅速提请领导注意。生产单位是高层领导的主要信息源。如果问题是通过其他渠道了解到的,则高层领导在采取纠正行动时都能谨慎行事,不绕过生产管理人员。

队伍建设被认为是搞好管理的一项重要任务。通过强调合作、互通信息和协调的必要性好处,培养和加强协同精神。下面的活动是管理部门深入实际的范例。这种深入有助于培养协同精神和加强职工的责任感。

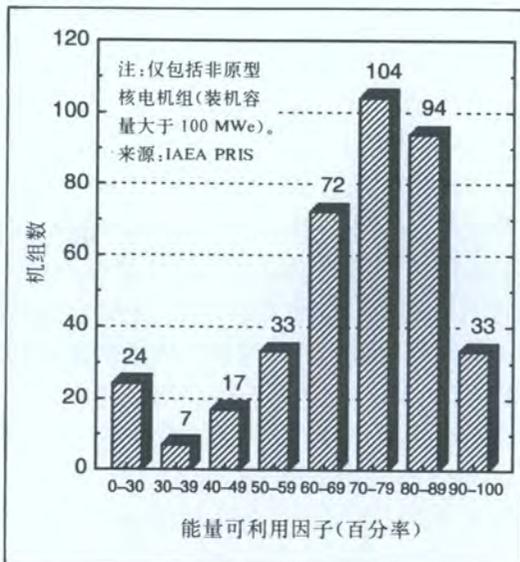
- 通过由运行、维修、技术、计划部门的主要骨干及其他辅助人员参加的每日“晨会”,检讨运行问题及其纠正行动;

- 由公司/外部保障单位组成的委员会或审查组解决需要跨部门权力的特殊问题;

- 让关键人员在电厂各部门之间和(或)电厂与公司保障部门之间轮换,以扩大职工的知识面和激励其创造性;

- 让系统工程师作为涉及电厂某特定

### 1990年的核电厂能量可利用因子



机组	国家(营运者)	堆型	净装机容量, MWe	开始商业运行	1985—1987年的 EAF	至 1987 年的累计 EAF
巴尔塞贝克-1	瑞典(SYDKRAFT)	BWR	600	1975年	89.3	78.3
巴尔塞贝克-2		BWR	600	1977年	91.5	84.2
布莱耶-1	法国(EDF)	PWR	910	1981年	82.0	76.6
布莱耶-2		PWR	910	1983年	85.7	81.3
布莱耶-3		PWR	910	1983年	89.4	86.9
布莱耶-4		PWR	910	1983年	81.5	80.9
福岛一大耳-1	日本(TEPCO)	BWR	1067	1982年	82.5	79.1
福岛一大耳-2		BWR	1067	1984年	74.5	79.8
福岛一大耳-3		BWR	1067	1985年	*	*
福岛一大耳-4		BWR	1067	1987年	*	*
贡德雷明根-B	德国(KGB)	BWR	1240	1984年	84.3	85.3
贡德雷明根-C		BWR	1248	1985年	83.3	83.3
洛维萨-1	芬兰(IVO)	PWR	445	1977年	92.7	81.6
洛维萨-2		PWR	445	1981年	89.0	86.3
皮克林-5	加拿大(OH)	PHWR	516	1983年	82.7	82.6
皮克林-6		PHWR	516	1984年	78.5	79.9
皮克林-7		PHWR	516	1985年	87.6	87.6
皮克林-8		PHWR	576	1986年	—	—
普雷里岛-1	美国(NSP)	PWR	503	1973年	83.9	78.4
普雷里岛-2		PWR	500	1974年	90.7	83.2
TVO-1	芬兰(TVO)	BWR	710	1979年	90.3	86.2
TVO-2		BWR	710	1982年	92.3	90.2

\* 调研时商业运行时间不足 23 个月。

来源: IAEA PRIS

注: EAF=能量可利用因子。此因子是从商业运行后的那个月开始计算的。

系统的各种活动的联络中心;以及

- 管理部门经常巡视核电厂,这种巡视是公开进行的,他们总是抽时间与职工交谈,显示出他们对职工的活动是了解的。

此外,卓有成效的管理部门总是注意实绩数据及其趋势分析结果。为此,通常把一组经挑选的因厂而异的实绩指标作为有效的工具,以便迅速察觉偏离标准的情况和提醒管理部门注意刚露头的问题。重要的是,要以张贴布告、分发实绩报告及在职工会议上讲评实绩趋势等方式,迅速将实绩趋势和成就告诉全体职工。

这些实践都很重要,因为它们使全体职工确信:

- 实绩方面的不足之处及其根源会被系统地查清,并会采取纠正行动以防再次发生;

- 改善实绩的目标和计划会被制定出来,并被列为工作重点和得到足够的资源;

- 工作进展情况在工作完成之前一直会受到监视。

坚定而严格的质量文化,被认为是核

电厂良好管理的重要组成部分。\* 这种概念体现在以下实践中:

- 质量保证计划均被扩大到核电厂中与电力生产有关的所有系统,而不仅仅是与安全有关的系统。

- 由任务执行者及与其有关的生产管理部门承担达到质量要求和核实质量要求达到情况的责任。

- 电厂的修改,不管是临时的还是永久的,都要由对受影响系统的设计意图十分了解的人员拟定、审查和核准,以保证拟议中的修改具备可操作性和可维护性。

- 有适当的机制确保将经核准的修改传达给本电力公司的姊妹机组,使它们也能采用。

- 依照修改过的结构迅速更新核电厂的文件(包括设计图纸和各种操作程序),撤销过时的文件,并采取措施保证有关职

### IAEA “良好实践” 调研涉及的核电机 组

\* 见 F. Hawkins 和 N. Pieroni,《核电厂质量保证:质量保证要以作业为基础》,《国际原子能机构通报》中文版第 33 卷第 4 期(1991)。

工了解这些变动。

核电厂主管部门还懂得与原工程承包公司和主要的卖方或供货单位建立和保持长期工作关系的重要性。良好的工作关系可带来重大的效益。

定期向卖方或供货单位提供有关它们的设备或部件的使用效果的反馈信息,是对核电厂主管部门与供应商的上述工作关系的有力支持。为了主动和迅速地交流经验,应鼓励卖方或供应商派代表常驻厂。业已证明,签订长期合同和开创性项目的研究与开发协定的做法(目的在于提供专门的检查/维修/工程服务及开发专用工具等),能对核电厂达到较高的可利用率作出重要贡献。

同样,与政府审管部门保持良好的和开诚布公的工作关系,对解决与许可证有关的问题、避免不必要的拖延及在核电厂停役期间抓紧进行就地的审管检查,都大有帮助。这也有助于提高电厂的可利用率。

核电厂完善而明确规定的各种纲要性程序,是健全的质量管理体系的关键组成部分,它们决定着核电厂能否安全可靠地运行。采取一种严格而系统的方法来制定、核准这些程序并确保其得到遵守,是电厂经理的一项重要任务。

**电厂的运行管理。**在实绩良好的核电厂中,各项操作都严格按规定进行,其目的是能迅速发现设备问题并采取相应措施,同时使人为差错减至最少。

供运行人员使用的辅助文件的质量,是使人为差错减至最少和使电厂达到良好实绩的重要因素。运行程序必须清楚、简明和规格化,以便于使用。运行程序由运行人员制定,在批准使用前由高级管理人员进行审查和现场验证,以便保证与电厂设计意图相符。运行程序还必须及时更新,以便反映新的情况和取得的经验教训。倘若电厂进行了重大的修改,则应将运行程序的变化迅速加进课堂或模拟器培训计划。应特别注意使代替正常程序的临时性操作指令的数量和持续时间减至最少和最短。控制这种情况的办法是,由高级职员、运行委

员会和(或)厂安全审查委员会经常审查尚未取消的临时性指令。

核电厂取得良好实绩的一个前提是,运行班组人员十分了解他们所管辖的设备和系统的现状。这是靠对电厂的状况实施严格的、十分规范的控制并进行连续监视实现的。

实现这种控制的办法是,由控制室的合格人员在控制屏进行例行检查并定期进行检查性试验,以证实各种部件和系统都处在合适的备用状态。建立明确的程序和报告渠道,旨在将缺陷记录在案并提请领导人员注意和采取纠正行动。记好运行日志,及时、准确和全面地反映出电厂活动的情况,是电厂状况控制的重要组成部分。高质量的运行日志有助于保持各运行班之间的工作连续性,确保问题一直有人跟踪直到解决为止,而且也有助于高级职员巡视时查看。要制定正式的程序,以保证交接班时能将电厂状况交待清楚。这个过程包括上下班人员对各项责任的交接取得一致。

对于现场设备的操作,包括为了进行维修而将其隔离,应实施纪律严明的行政管理措施。现场操作应按照书面的操作指令执行,操作指令书应由合格人员编写和批准。这些指令应列出每个部件的位置、状态和正确的操作顺序。核电厂运行程序中应明确规定例外情况的处置办法。如果发现现场的某台设备处在意外的状态,应暂停操作指令的执行,等待控制室人员进行检查。在有待进行的作业的性质、对附近工作人员的危害、设备隔离的细节以及维修后拟进行的试验等方面,运行人员与维修人员应保持密切的联系。要在记录所进行的活动和所接受的责任的记录上签名,对此要有详细的规定。明确规定恢复正常运行之前由谁负责审查,并明确规定由谁作出重新启动的决定。这套办法体现了核电厂安全第一、生产第二的基本思想。

出色的营运者总是特别注意减少运行人员的辐照量、监测放射性排出物和减少放射性固体废物的体积。下面是值得提及的几个方面:

● 事前分析将要进行的辐射作业,监测作业执行过程及其结果。确保安装在控制区入口处的精心设计的系统都在工作。

● 特别注意监测放射性排出物。配备进行环境监测的流动实验室,对烟囱中的放射性核素连续进行监测,以及定期(每日)监测一回路冷却剂中的放射性核素。

● 除其他措施外,还通过大型部件的清洗和清理,注意减少放射性废物的体积。

在运行得好的核电厂中,对化学尤其是水化学是十分注意的。为此,对水—蒸汽回路要进行在线的监测,对凡是影响核电厂化学状态的每一事件都要定期进行分析,并以此为依据编写化学工作者培训教材。此外,还设置了专门的腐蚀调查计划。

**组织好维修。**维修活动能否认真准备、严格管理和及时完成,对电厂的可利用率影响甚大。

为使设备达到最高的可靠性,从而提高电厂实绩,出色的营运者越来越多地实施预防性维修。这种做法由于能更全面地规划维修活动,减少中断运行的次数和更均衡地利用维修资源,因而有助于降低维修费用。为了保持运行设备处于良好状态,正在采用许多预防性维修技术。这类技术可提醒营运者注意刚刚露头的设备性能下降,从而减少强迫停堆和便于安排预防性及纠正性维修。

出色的营运者总是迅速完成纠正性维修,密切注意积压的维修工作。他们掌握着一份最新的需要机组停运的作业清单,为了最充分地利用计划外的停役时间,还编写重点作业清单。建立设备档案,包括完整的维修记录。此类档案简要地记载已完成的作业,受到的辐射照射量,完成任务所花费的时间,对“被发现时”的设备工况的观测结果以及就今后如何完成作业提出的改进意见。对于关键性的维修工作,在现场实际维修之前,应先在模拟器上进行演练。要建立工具帐目,并在专门划定的维修区范围内严格控制工具的使用,以防外来物件意外地进入系统或部件。大量使用自动化工具装备,以降低工作人员的辐射照射量,

减少完成任务所需的时间和劳力,以及提高作业的完成质量。在现场存有充足的备件,可以保证维修工作的顺利进行。对备件仓库的器材必须实行有效的管理,包括计算机化的存量管理,收货时的质量检查,注意仓贮条件以防性能退化,以及给零部件加上适当的标签。对于某些大型备件,采用电力公司内部统筹的方式,是一种有利于实施大型部件检修计划的好方法,能缩短电厂停役时间。

就地的维修辅助设施也很重要。这些设施可包括:用于浸泡部件(例如一回路冷却剂泵叶轮和阀门内构件)以使检修方便快捷的化学、电化学或超声波去污槽;对受污染部件进行大修的专用车间;以及配备培训和试验工具用模拟器的演练设施。对专用维修工具装备的存放给予特别的注意,其中包括制定相应的规程,以保证工具都加上适当的标签,便于查找,并确保工具装备在使用后得到有效的去污或修理,保证处于可供下次使用的备用状态。

用于换料和检查维修的计划停役,是实绩良好核电厂的不可利用时间的主要组成部分。因此,有效的停役管理被看成是使核电厂总体上取得良好实绩和达到高的可利用因子的重要原因。\*

有助于良好的停役管理的主要因素包括:

- 组建一个主管停役工作的精干班子,全面负责停役目标的实现并尽量缩短停役时间;
- 制定长期的停役战略,该战略应符合电力公司以最佳的费用—效益方式长期安全可靠地运行的要求;
- 要有详细而全面的停役规划和准备,确保到时候可以调动厂内外的合格人力资源和专用工具装备完成与停役有关的工作;
- 注意对承包人员的挑选、向他们介

\* 见 *Good Practices for Outage Management in Nuclear Power Plants*, IAEA TEC-DOC 621, Vienna (1991)。

绍情况和监督其任务的完成情况；

● 停役后的全面总结，找出应汲取的教训，并为今后的改进指出方向，以采取防止缺陷再现的彻底而持久的纠正措施。

严格而系统的停役总结过程具有重大的根本性的好处，在此过程中应发动全厂职工提出可能的改进意见。使每个职工再次有机会为实现电厂的目标作出贡献，从而增强每个职工的责任心和主人翁感。总结过程是加强职工职业道德的方法之一，从而使核电厂不断得到改进。

**技术保障。**本厂和公司的强有力的和充分的技术保障，是电厂能按照高的运行安全标准可靠运行所必不可少的。

有效的技术保障是通过制定并实施一项技术监督计划来实现的，其对象是机组内对安全性和可靠性十分重要的所有系统。该计划包括采取措施，确保在对运行参数和机组各系统性能定期进行常规检查方面有明确的工作程序和职责分工，以评定它们随时间的变化。这一工作是有计划地完成的，具体做法包括分析运行日志和维修报告来审查各种缺陷，并及时评估常规的和特殊的系统试验的结果及其趋势。定期审查核电厂的各种程序，以保证这些程序随着电厂的某些修改而及时更新，并能充分地吸收运行经验。

重要事件，包括“差点出事”的情况，应迅速向高层管理部门报告。为此，制定了一些细则，规定哪类事件需要加以审议、列出审议的方法，并明确由谁负责确定和执行有关的纠正行动。

对运行经验进行充分和系统的分析，是提高核电厂实绩所必需的。这种分析是技术保障人员的一项重要任务，他们得到电力公司各部门、高层管理部门和“特设”的多学科审查委员会的帮助。本厂或本公司的运行经验还应利用其他厂或其他公司的运行经验加以补充。为此，一个管理得好的技术保障部门，应采取一些措施，设法通过核信息网系统获取外部的反馈经验。核信息网系统包括核电运行研究所的重要运行事故报告；IAEA 和 NEA/OECD 的事件

报告系统；卖方/供应商的通报和通讯；以及世界核营运者协会或电力生产者和分配者联合会这类跨国公司团体的信息网。

技术保障部门的技术监督活动的调查结果和研究成果，通过论述安全、环境和实绩等关键参数的正式报告定期提交电厂经理。报告应包括设备或部件的运行简史及关于它们对电厂安全性与可靠性的长期影响的评价意见。

**培训与资格审查。**在核电厂和培训中心，重点放在教员的培训和用模拟器培训运行人员上。

教员的技术水平应通过定期参与核电厂的各种活动来提高。教员应象持照的运行人员那样保持其操纵员执照，并参加操纵员资格复审活动。在一些为新建电厂建立的培训中心，曾特别注意制定完善的操纵员模拟器培训计划。这些新建的培训中心配备了全尺寸的模拟器，以及一些小型的模拟部分任务的模拟器。核电厂还使用这两种模拟器补充理论培训。此外，涉及不同学科的专职培训部门有利于在培训期间交流工作经验。

得到特殊注意的另一领域是维修人员的培训，这方面的培训设施也得到了重视。人们还注意了有关停役的专门培训班和演练，以及换料操作培训。这类培训涉及以往停役期间汲取的教训、质量保证、工业安全、辐射防护、减少废物量以及分析新任务。

一些电厂采用的这套培训一般职工的方法，有助于建立安全文化。

### 良好运行的关键

值得注意的是，从这两项独立进行的 IAEA 调研的结果来看，它们所总结出的核电厂良好运行实践十分相象。实际上，能提高电厂实绩的那些实践同确保电厂运行安全的那些实践确实是完全相同的。

最重要的结论之一是，保障纪律严明地运行的那种质量最高的管理，是实现电厂总体的安全性、可靠性和经济性等目标的关键所在。 □