



更好的政策，更美好的生活

核动力厂职业照射辐射防护 最优化工作管理

经济合作和发展组织[英] 著
岳会国 陈凌 杨洪润 译
唐邵华 毛亚蔚

本译著在经济合作与发展组织的安排下出版。它并非经济合作与发展组织的官方正式译著。其翻译质量及与原著中原语文本的一致性仅由译著者自负。如果原著与译著之间产生任何分歧，以原著文本为准。

中国原子能出版社

图字:01-2016-2244

图书在版编目(CIP)数据

核动力厂职业照射辐射防护最优化工作管理 / 英国经济合作与发展组织(OECD)著; 岳会国等译. —北京: 中国原子能出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5022-7002-5

I. ①核… II. ①英… ②岳… III. ①核电站-辐射防护 IV. ①TL75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 000594 号

经济合作与发展组织出版的原著英文名称如下:

Work Management to Optimise Occupational Radiological Protection at Nuclear Power Plants, Radiological Protection

© 2009 经济合作与发展组织

所有权利保留

© 2016 中国原子能出版社, 中文版

核动力厂职业照射辐射防护最优化工作管理

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 付 凯

装帧设计 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市 中画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 880mm×1230mm 1/32

印 张 6 字 数 162 千字

版 次 2015 年 12 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-7002-5 定 价 48.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

中译本致谢

2010年5月中国核学会辐射防护分会辐射安全标准研究专业委员会成立后,核动力厂辐射防护最优化(NPP-optRP)任务组成员,根据任务组要求,将职业照射信息系统(ISOE)2009年颁布的核动力厂职业照射辐射防护最优化“工作管理”一文,翻译整理成册,为任务组开展相关工作提供参考。由于翻译时间仓促,译者水平有限,难免出现错误,如有疑问,请使用者参阅原文。

翻译组:岳会国 陈 凌 杨洪润 唐邵华 毛亚蔚

校对:岳会国(1-3章)

杨洪润(4-5章)

唐邵华(6章)

毛亚蔚(7-8章)

陈 凌(9-10章、附录)

前 言

自 1992 年以来,职业照射信息系统(ISOE)为来自全世界核动力行业和国家监管当局的辐射防护专家们提供了一个讨论、促进和协调有关核动力厂工作人员辐射防护的国际合作事业的探讨的平台。ISOE 的目标是通过互相交流职业辐射防护最优化方法的相关信息、数据和经验,改善核动力厂的职业照射管理。

职业照射管理成功的关键在于核动力厂对此工作的仔细计划和执行,称之为工作管理。工作管理强调对工作任务的多专业全面分析以及工作不同阶段的全过程管理。通过致力于关注所执行的工作任务的是否按计划、按照预算以及能否满足预期目标和职业照射辐射防护优化目标等方面来保证工作任务的成功实施。

自从 1997 年第一份关于工作管理的 ISOE 报告出版以来,该方法在全世界范围的核动力厂内得到了广泛的执行,经过历年的应用表明这种方法能够有效的同时降低工作人员职业照射和运行的费用。然而,核动力厂始终面临着经济的和管理的双重压力,同时也发生了许多其他变化,包括辐射防护体系演变,技术进步,社会、政治和经济形势,以及新的核设施的开发前景。辐射防护专家之间持续的经验交流具有无比的重要性。这些共同的挑战和经验为在 21 世纪初期重新考虑工作管理提供了一个实用知识的深厚基础。

这个关于工作管理的最新报告为工作管理原则的应用提供了实际的指导,有助于职业辐射防护的最优化。该报告指出,当工作管理不再是一个新的概念时,仍需继续努力,确保在当前和

未来的挑战面前,保持它的良好表现、成果和趋势。因此,本报告的重点在于提出工作管理的关键方面,供管理人员和工作人员考虑,从而节省时间、减少剂量和节约资金,并通过不断更新 ISOE 共享的实践例子来提供支持。

ISOE 由 OECD 核能机构和国际原子能机构共同发起。

ISOE 网址: www.isoe-network.net

目 录

1	引言	1
1.1	背景	1
1.2	工作管理的原则	4
2	管理方面	9
2.1	概述	9
2.2	国际标准和导则	9
2.3	国家管理政策	16
2.4	企业内部规程;运行限制	24
2.5	小结	28
3	ALARA 管理政策	29
3.1	概述	29
3.2	核动力厂 ALARA 大纲	29
3.3	职责与责任	31
3.4	ALARA 委员会和其他特定的 ALARA 组织	36
3.5	ALARA 审查	39
3.6	电厂 ALARA 导则	42
3.7	小结	44
4	工作人员的参与和效能	45
4.1	简介	45
4.2	影响 ALARA 实施的工作人员效能	45
4.3	实施 ALARA 原则的教育和培训	46
4.4	影响工作人员参与的因素	49
4.5	小结	56

5	工作计划与进度安排	58
5.1	简介	58
5.2	停堆检修期间的最优化	58
5.3	作业计划流程	63
5.4	工作流程控制体系	69
5.5	高剂量作业的作业计划	72
5.6	基准分析	76
5.7	人员准备	79
5.8	小结	84
6	工作准备	86
6.1	简介	86
6.2	源项特性	86
6.3	源项降低技术	88
6.4	照射降低技术	103
6.5	工具和设备	113
6.6	人员防护器具	118
6.7	工作场所最优化与任务协调	118
6.8	小结	120
7	工作执行	121
7.1	简介	121
7.2	工作流程控制:职责的分配	121
7.3	进入(access)控制系统	124
7.4	远程监测系统	131
7.5	污染控制	133
7.6	不必要剂量的避免和通行照射的降低	137
7.7	避免返工	141
7.8	废物管理	142
7.9	工作执行期间经验反馈的收集	143

7.10	小结	145
8	工作评价和反馈	146
8.1	简介	146
8.2	工作审查和跟踪	147
8.3	运行经验数据库	152
8.4	ALARA 实践的比较	154
8.5	经验反馈共享	157
8.6	项目审核	158
8.7	小结	160
9	确保持续改进	162
9.1	简介	162
9.2	新核动力厂设计和建造中的源项降低	163
9.3	新建核动力厂的屏蔽	166
9.4	新建核动力厂的远程监控系统	166
9.5	新建核动力厂的机器人技术	167
9.6	新建核动力厂的免维护部件	168
9.7	新建核动力厂的工作管理	168
10	结论	170
	参考文献	171
	附录 1 ISOE 项目信息	173
	附录 2 ISOE3 工作相关的信息报告实例	175
	附录 3 工作前 ALARA 确认表实例	176
	附录 4 工作后复查表实例	178
	附录 5 放射建议表实例	182

1 引 言

1.1 背景

核动力厂以极高的工程标准建设,由经过严格训练并获得执照的操纵员负责运行,并由国家管理当局独立评价。无差错运行的要求对于核动力厂技术的安全、效率和公众可接受度而言是必不可少的。

20 世纪 60 年代和 70 年代核工业的特点是核动力发电厂快速发展,替代大型燃煤和燃气电厂。然而,在 70 年代末和 80 年代,三哩岛 2 号机组和切尔诺贝利核电厂事故减慢了核动力厂在许多国家的推进速度。作为对这种情况和不再扩张的反应,80 年代在很大程度上致力于提高运行反应堆机组的安全性。

很多国家在 90 年代准备解除电力工业中对核设施的限制。例如,为寻求反应堆机组更安全更有效的运行、换料和提高年负荷因子的方法,美国核工业以欧洲工作管理的实践为标准检查他们的活动和表现。截至 2000 年,一些国家的核工业在执行更快更有效地换料和维修停堆方面已经具备突出的能力,并同时不断提升职业辐射防护的最优化工作。仅在美国,负荷因子由七八十年代的 80% 上升到了 90 年代的约 90%。与此同时,也减少了整个核工业工作人员的职业照射。

结果,在全世界,核动力厂职业照射自 90 年代初期以来稳步减少。管理的加强和技术的进步改进了核动力厂的设计和运行规程,ALARA 文化和信息交流对这种下降趋势做出了贡献

(图 1)。但是,随着全球核动力厂的持续老龄化和可能的寿期延长,持续的经济压力,管理、社会和政治变革,以及新核设施的潜力,确保职业照射合理可达到的低(ALARA),同时考虑运行成本和社会因素,使辐射防护人员持续面临着挑战。

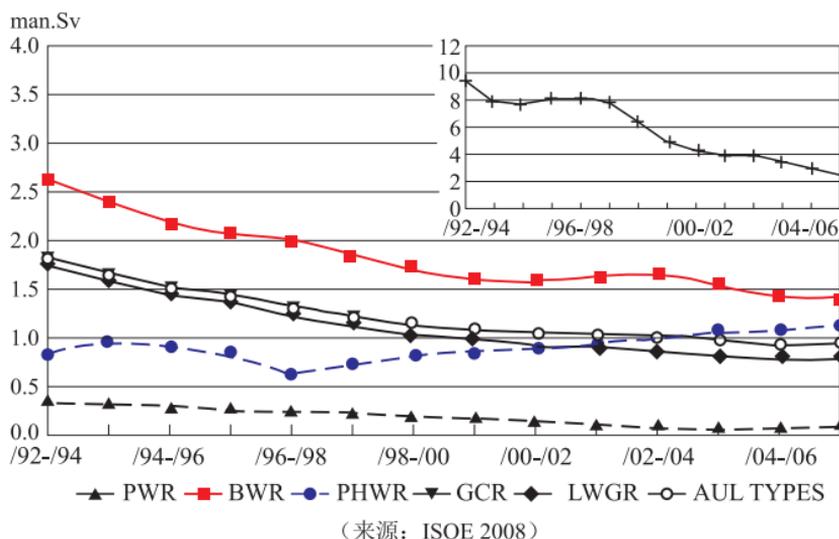


图 1 ISOE 1992—2007 运行反应堆 3 年滚动平均集体剂量(人·Sv)

自 1992 年以来,由 OECD 核能机构(NEA)和国际原子能机构(IAEA)共同发起的职业照射信息系统(ISOE),为来自全世界核动力行业和国家监管当局的辐射防护人员提供了一个讨论、促进和协调有关核动力厂工作人员辐射防护的国际合作事业的论坛(见附录 1)。ISOE 的目标是通过互相交流职业辐射防护最优化方法的相关信息、数据和经验,改善核动力厂的职业照射管理。

为此,ISOE 包括一个全球职业照射数据收集和分析程序,已成为全球最大的核动力厂职业照射数据库,还包括一个在参与者中间共享剂量减少信息和经验的交流网络。这些资源,包括 ISOE 网络信息交流的网址(www.iso-network.net),对 ISOE

计划的参与者都是可以使用的。^①

获得上述成果的关键在于对认真策划和执行核动力厂换料和停堆维修重要性的广泛认识。基于此点,第一期关于核动力厂工作管理的 ISOE 报告(NEA, 1997)是一份重要的报告。在以更少的操作和技术人员来完成既定的生产目标方面,该报告与核动力厂关注的重点是一致的。短期内,该报告成为一个指南,吸引了辐射防护管理人员、核动力厂经理和高级经理的强烈兴趣。建立在 ISOE 最初几年经验之上的这份报告,在工作管理的原则还没有完全融入到日常工作实践中时,对核动力厂职业辐射防护的最优化有着重要的贡献。

工作管理强调从多学科协作的观点开展工作的重要性,以及贯穿整个工作全过程的重要性,包括概念、设计、计划、准备、执行和后续阶段。如果把注意力高度集中在所开展的工作上,就能够保证这些工作成功地完成——在经费预算之内,按时且具有较高的质量水平和最大的预期目标来实现,并能够从职业辐射防护的角度体现最优化。

现在工作管理已经在全世界的核动力厂内得到了广泛执行,并且经过若干年的实践,证明它不但有利于降低职业剂量而且有利于降低运行成本。然而,核动力厂始终面临着经济的和管理的双重压力,同时有些情况也正在发生变化,包括辐射防护体系演变,技术进步,社会、政治和经济形势变化,以及新的核设施的开发前景。来自全球核动力行业和国家监管当局的辐射防护人员之间不断的信息和经验交流具有非常的重要性。这些共同的挑战和经验为在 21 世纪初期重新考虑工作管理提供了一个深厚的实用知识的基础。

考虑到第一期工作管理报告十年来在辐射防护人员当中的

^① ISOE 的正式参与者包括同意 ISOE 条款后参与 ISOE 的核电用户和国家监管机构。

广泛应用,以及自其出版以来工作环境的变化,作为对 ISOE 亚洲技术中心所提建议的回应,ISOE 管理委员会在 2007 年组织 ISOE 工作管理专家组(EGWM),来完成一份反映当前知识和技术状态以及核动力厂工作人员职业辐射防护经验的最新报告。

与 1997 版报告相比,当前这份关于“核动力厂职业辐射防护最优化工作管理”的报告的目标是对工作管理原则的应用提供实践指导,为职业辐射防护最优化做出贡献。报告指出,当工作管理不再是一个新的概念时,仍需继续努力,确保在当前和未来的挑战面前,保持它的良好表现、成果和趋势。因此,这个报告的重点就在于提出工作管理的关键要素,供管理人员和工作人员参考,从而节省时间、减少剂量和节约资金,这由 ISOE 所提供的最新的实例所支持。EGWM 希望这个方法能为读者带来实际价值并促进工作表现的不断改进。

1.2 工作管理的原则

核动力厂的运行和维修必然包含工作人员的职业照射。但是,经验表明,一个条理清楚并且全面的工作管理方法,除了有助于做好辐射防护之外,还有利于电厂的安全经济运行。

工作管理,正如本报告中提到的那样,是一门综合的方法学,强调的是所有相关参与者利用多学科协作方法,从计划到后续整个过程的管理工作的重要性。尽管剂量减少仅仅是该方法中的一部分,但核动力厂的辐射防护部门是这个协作中的一个关键组成部分,它必须在这样的背景中运作,确保职业照射保持 ALARA。

核动力厂职业照射的决定因素是工作场所的辐射水平、在这些场所停留的时间以及涉及工作人员的数量。这些因素既受技术措施的影响,也受管理措施的影响。剂量减少常常通过降低源

项、减少控制区工作人员数量、缩短工作人员在控制区的停留时间和减少返工量(由于设计、设备或运行缺陷)来实现。

工作管理方法的目的是在设施经济可行的前提下实现职业辐射防护的最优化。如果应用恰当,工作管理将促使职业照射以 ALARA 的方式减少。这样,降低成本和常见安全风险以及尽可能减少停堆所需时间的目标常常可以同时实现。简而言之,工作管理原则的有效应用将节省时间、剂量和资金。在这一方面,重要的因素是那些能够影响以下几点的措施、方法和技术:

- 剂量和剂量率,包括源项的降低。
- 照射,包括因为运行、维护、检查和修理工作而在控制区停留的时间。
- 工作计划的效力,包括短期和长期计划,工作人员参与,行动的相互协作,训练和报告。

积极的和有组织的安排对工作管理方法有效性的影响由于具有广泛性和横向性而显得同样重要。先前所提到那些方面的责任可能属于一个设施组织结构的不同部分。因此,工作管理的多学科特征必须被认知、诠释并很好地融入到任何工作当中。

这本书基于 ISOE 计划内的运行经验,在工作管理关键领域内为职业辐射防护的最优化提供实际指导,包括:

- 管理方面
- ALARA 管理政策
- 工作人员参与及执行
- 工作计划与流程
- 工作准备
- 工作执行
- 工作评估与反馈

适用于这些领域中每一个工作管理的具体方面可由 ISOE 实践中的例子和案例研究解释说明。提出这些主题和实际例子的

意图是为参与工作管理的所有人,提供旨在优化核动力厂职业辐射防护工作中主动性执行工作管理的良好实践经验。

工作管理是一项综合的和反复的工作。工作管理的基本原理是一个连续循环,由计划和进度安排、准备、执行、评估和后续工作组成,目的是使整个工作逐渐优化(图 2)。反馈是一个关键环节,这些反馈不仅可以从本地获得,还可以从世界各地获得。评价和反馈是工作的最后一步,同时也是整个过程的第一步。但是工作管理也是向前发展的,因此,认识到以上主题中所包括的许多参数的不断演变,例如持续的技术进步,利用过去和当前的教训警示将来的工作以及将来的设计和运行,本报告以“确保持续改进”一章作为结束。

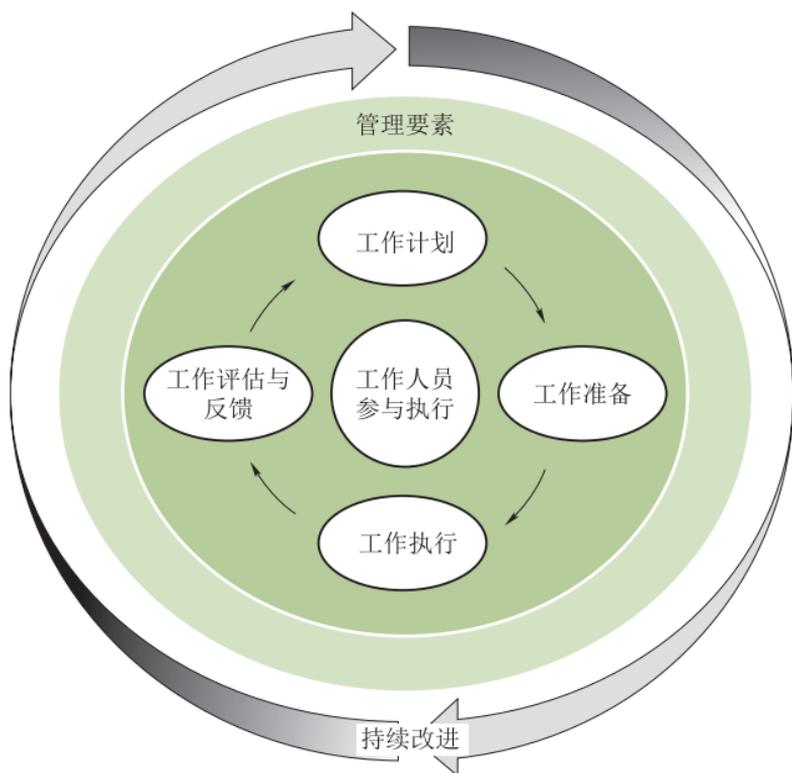
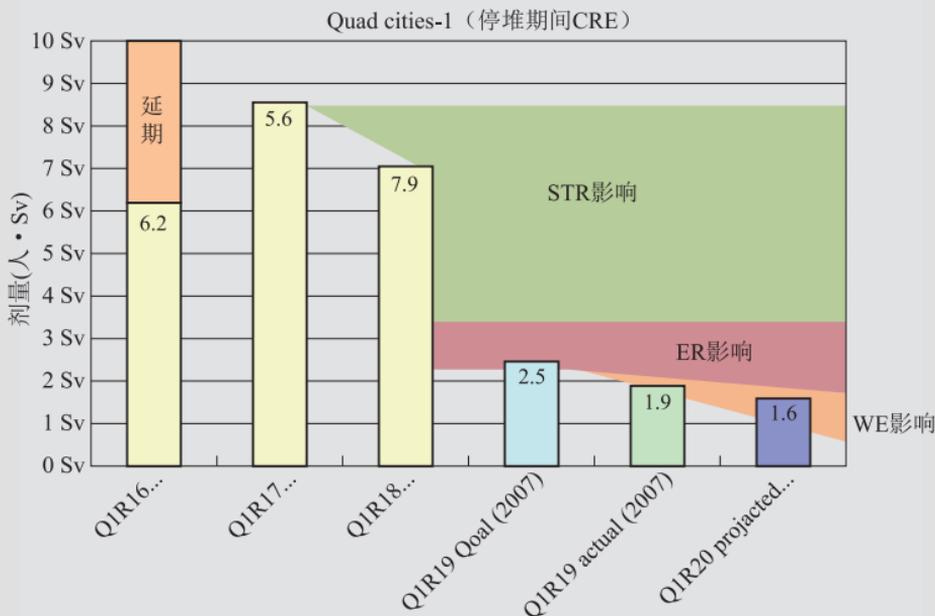


图 2 工作管理要素及关系图

美国: Quad Cities NPP 工作管理的一个例子(有组织的 ALARA)

Quad Cities-1 NPP 通过一个强调工作管理所有组成部分的综合方法(或有组织的 ALARA),成功地减少了集体辐射照射(CRE)。由于考虑到化学过程对一次侧和二次侧管道剂量率的影响,以及关系到机组改进的设备对剂量率的影响,在源项降低(STR)、设备可靠性(ER)、工作人员参与(WE)和规划上的共同努力已经将 CRE 由 2002 年换料停堆期间的 8.6 人·Sv 降至 2007 年换料停堆期间的 1.9 人·Sv。在这些方面中的每一方面的积极应用使得实际的 CRE 减少了 70%。



各方面成功的行动包括:

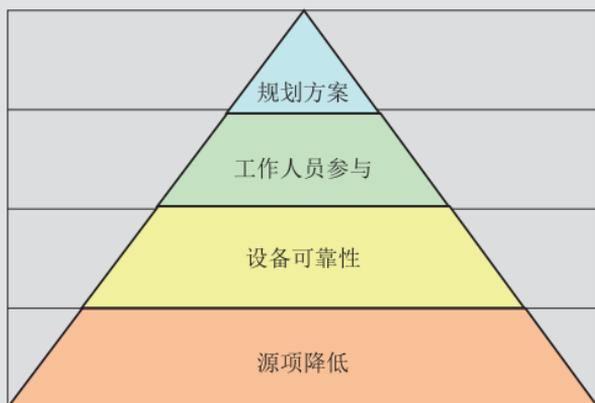
源项降低:再循环管道和汽水分离器的化学去污;更换含有钨铬钴合金防腐蚀层的汽轮机叶片;使用由副厂长签字批准的现场照射降低许可证;现场管理词条和日常讨论中加

入化学参数;运行关注水化学控制;致力于达到最低的行业指导要求和实现措施的最好表现如 Co-Zn 比。

设备可靠性:功率提升矫正,通过有效的诊断和处理潜在原因解决电厂运行偏离问题;在蒸汽管上进行声学旁路修改,解决 30 多年的老的震动问题,大大减少设备失效(现在震动比原来满功率的振动减少了 50% 多);替换蒸汽干燥器增加了容量,与功率提升相呼应;开发人员执行相关技术的理念和原则是以控制包括照射问题在内的工程活动;将剂量作为一个待定值纳入核动力厂健康委员会进行优先改进的讨论中;把剂量融合到设备可靠性优先级列表中。

工作人员参与:建立个人剂量责任制,包括个人日剂量目标;执行辐射工作许可票制度,强制实施进入时个人剂量的监测和登记;对全体工作人员表现和反馈实施第一监督权;在“日计划”管理会议上对超过 $10 \mu\text{Sv}$ 的管理责任进行说明。

规划方案:对工作人员的剂量实时监测,说明总的优/差表现;建立公司的 ALARA 委员会,在电厂经理层次上对剂量进行现场管理,并对运行的更高级副经理负责;将包括未来工作(超过 5 年)的剂量影响的长期计划,作为决策过程的一部分。



2 管理方面

辐射防护的基本原则(正当性,辐射防护最优化和个人剂量限值)是建立在国际层面上的。国家层面的标准更详细地制定了与这些原则相一致的辐射防护体系。在这个体系内,营运单位也应该制定和确立它们自己的内部规程,并在具体情况具体分析的基础上,确定个人和集体照射的管理目标。

2.1 概述

虽然许可证持有者对确保一个特定操作在核安全和辐射防护方面的安全性负有首要的责任,但这也必须在一个合适的管理体系下完成。管理体系的目的是通过核安全法规保证民用核设施安全性的维持和提高,通过辐射防护标准确保工作人员、公众和环境免受电离辐射的危害。这种管理提供了一个有效的辐射防护基础结构,其中包括由那些负有防护责任的从工作人员到管理人员共同遵循的“安全文化”,因此许可证制度成为管理当局可利用的控制手段之一。这种制度在执行水平上可能各不相同,因此可能影响核动力厂在它们工作管理方法中的不同选择。这一章简要讨论国际辐射标准和导则以及它们在各国管理体系下的执行方法。

2.2 国际标准和导则

一些国际组织对在辐射防护领域建立科学的和合法的体系

贡献显著,因而也对各国采用用以管理核设施的安全标准有着重要影响。虽然没有正式界定的组成成员,但这些国际组织包括联合国原子辐射效应科学委员会(the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)、国际放射防护委员会(the International Commission on Radiological Protection, ICRP)、国际原子能机构(the International Atomic Energy Agency, IAEA)、欧洲联盟委员会 the European Commission)和经济合作与发展组织核能署(the OECD Nuclear Energy Agency, NEA)。此外,其他政府间和非政府组织及规划也对新标准的制定提供了反馈和指导。这些团体在建立辐射防护体系中的角色讨论如下(图 3)。

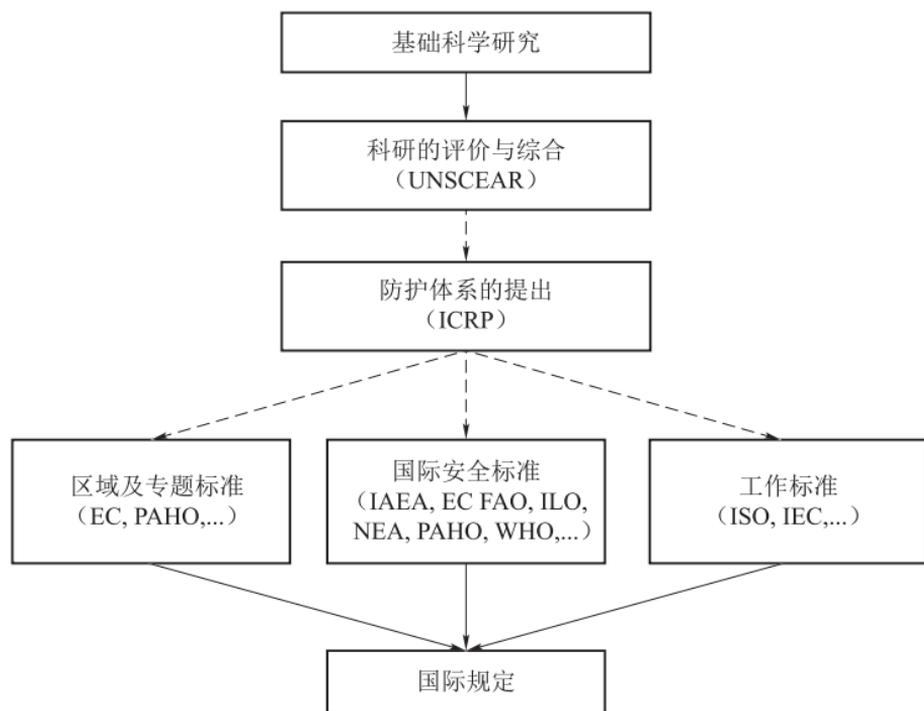


图 3 辐射防护标准和规定的形成^①

^① EC:欧洲共同体;FAO:联合国粮农组织;IEC:国际电工委员会;ILO:国际劳工组织;ISO:国际标准化协会;PAHO:泛美卫生组织;WHO:世界卫生组织

联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR)

UNSCEAR 由联合国于 1955 年成立,负责收集和评价由天然源和人工源产生的用于和平目的和军事目的的电离辐射水平及效应的信息。全世界的政府和团体依赖 UNSCEAR 的评价,将其作为评估辐射危险和制定防护措施的科学根据。

UNSCEAR 系统地回顾和评价了职业、公众及医疗照射的全球及地区水平和趋势。它还对来自有关日本原子弹爆炸的幸存者以及其他受照群体研究的辐射诱导健康效应的证据以及在辐射诱导健康效应发生机理的科学认识上的进步进行定期的评价。这些评价(例如 UNSCEAR, 2000, 2001, 2006)为 ICRP 提出其辐射防护建议以及联合国系统中的相关机构制定国际辐射防护标准提供了一个科学基础。

国际放射防护委员会 (ICRP)

ICRP 是一个非政府科学组织,在 1928 年由第二次国际放射学代表大会成立。它被认为是世界上最重要的辐射防护机构,不时发布作为辐射防护领域内标准和导则的普遍基础的建议。ICRP 的权威来源于选自一系列科学学科的独立成员的名望以及它所提建议的价值。

ICRP 限制电离辐射有害影响的建议发布在其出版物中,并通过随后的声明阐述或扩展相关建议。50 多年来,ICRP 的建议一直作为管理电离辐射的主要国际和国家标准及准则的基础。2007 年年底,ICRP 第 103 号出版物(ICRP, 2007)发布了经过广泛构思和磋商的新的总建议。第 103 号出版物正式取代了 1990 年发布的第 60 号出版物(ICRP, 1991)的 ICRP 总建议。在该报告出版时,大多数国际标准和国家规章都以 ICRP 第 60 号出版物为基础。

ICRP 辐射防护体系

三条基本原则构成了全世界辐射防护标准和规章的基础,在

ICRP 第 60 号出版物中有详细说明,并且在第 103 号出版物中重申如下:

- 正当性:任何改变辐射照射状态的决定都应该利大于弊。
- 防护最优化:在考虑了经济和社会因素之后,引起照射的可能性、受照射人员的数目和个人受照剂量的大小都应该保持在可合理达到的尽可能低的水平。
- 剂量限值:除患者的医疗照射外,任何个人从受到来自监管源的计划照射的总剂量不能超过相应的限值。

新的总建议的主要特征是合并增加了自第 60 号出版物以来 ICRP 所发布的建议,如下所述(ICRP, 2007):

- 坚持辐射防护的三条基本原则,并阐述它们如何应用于产生照射的辐射源和接受照射的个人。
- 修正辐射和组织权重因子,以及基于最新有用科学信息的辐射损害。
- 由以往的基于过程的实践和干预的防护方法发展为以计划、应急和现存照射为特征的基于状态的方法,并将正当性证明和防护最优化的基本原则应用于所有可控的照射情形。
- 来自所有监管源的计划照射的有效剂量和当量剂量的个人剂量限值保持不变。
- 再次强调辐射防护最优化原则,应该以相似的方式适用于所有照射情形,具有个人剂量和风险约束(计划照射的剂量和风险约束;应急和现存照射的参考水平)。
- 包括一个制定环境辐射防护论证体系的方法。

剂量限值:除了重申辐射防护的三条基本原则之外,新的 ICRP 总建议保留了原来在第 60 号出版物中确定的剂量限值。对于计划照射情形下的职业照射,ICRP 推荐的限值以有效剂量表示为 20 mSv/a,为连续 5 年的平均值(5 年共 100 mSv),进一步

规定任何一年中的有效剂量不应超过 50 mSv(ICRP, 2007)。1996 年的国际基本安全标准(IAEA, 1996)和 1996 年的 EURATOM 基本安全标准(EURATOM, 1996)都规定个人剂量限值为 100 mSv/5 a,最大为任何单一年 50 mSv。^①

最优化:最优化的实际执行意味着在主要情况下防护水平应当是最佳的,取利弊之差的最大值。ICRP 建议为了避免这种优化过程的严重不公平的结果,应当对个人受到特定源的剂量或危险需要加以限制,称为剂量约束。对职业照射,剂量约束是一个用来限制选择范围的个人剂量数值,因此在最优化过程中仅仅考虑那些预期所引起的剂量低于约束值的选择(ICRP, 2007)。剂量约束不是一个管理限值,然而,如果超出,就应当适时地对防护行为进行审核和修改。辐射防护最优化原则的进一步进展情况见 ICRP 第 101 号出版物(ICRP, 2006)。

国际原子能机构(IAEA)

国际原子能机构成立于 1957 年,是一个在联合国系统内的独立的政府间组织。它的主要目标是为了全世界的和平、健康和繁荣而发展原子能。在国际辐射防护体系中,IAEA 扮演了一个特殊的角色,代表国际的一致意见,制定国际安全标准、法规和导则。

一些 IAEA 标准,由于它们的广泛性和适用性,而由其他国际和政府间组织与 IAEA 联合发起,以避免重复劳动并防止发布相矛盾的标准。1996 年的 IAEA“电离辐射防护与辐射源安全国际基本安全标准”(BSS)由六个国际组织联合发起,^②有助于确保 BSS 被不同的国际政府组织和它们的支持者广泛的应用。1996 年的 BSS 在很大程度上建立在 ICRP 第 60 号出版物中所述辐射防护原则的基础之上。虽然没有对任何国家强制要求,但大多数

^① 截止本报告出版时,1996 年的国际基本安全标准和 EURATOM 基本安全标准均处于修订过程中。

^② FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, WHO。

的 IAEA 成员国现在已经将国际上的 BSS 整合到了它们的国家法律之中,或者与那里面的条款保持一致。

考虑到新的 ICRP 总建议、1996 版 BSS 的执行经验以及自 1996 年以来发展形成的 IAEA 标准和其他重要文件,2005 年开始启动了国际基本安全标准的修订和更新程序,新版本希望所有的共同发起组织通过它们自己的机构体制给予认可。

此外,IAEA 还在两个重要出版物中提到了最优化原则。

- 职业辐射防护安全导则,RS-G-1.1(IAEA, 1999),那里面描述了 ALARA 的主要特征以及剂量约束和调查水平的作用。
- 控制职业照射的辐射防护最优化安全报告,安全报告丛书 No. 21(IAEA, 2002),给出了评估照射状态的实用建议,减少照射的手段以及 ALARA 计划的说明和执行。

欧洲联盟委员会 (EURATOM)

1957 年 3 月,EURATOM 协议在罗马签字,随后于 1958 年 1 月 1 日开始生效,拥有与欧洲经济共同体(EEC)一样的成员国。EURATOM 的目标是推动成员国之间的共同努力,为了和平目的发展核能。

协议的第 2 章(b)部分(成立欧洲原子能共同体)规定为保护工作人员健康和普通公众免受电离辐射危害确立基本安全标准。这些标准在欧洲委员会提出的一个欧盟(EU)官方指令中有详细说明,因此对成员国具有法律约束效力。在官方指令 96/29/EURATOM 中制定并于 1996 年 5 月被欧洲理事会采纳的“EURATOM 保护工作人员健康和普通公众免受电离辐射危害的基本安全标准”(EC, 1996)建立的基础是 ICRP 第 60 号出版物的建议。欧盟成员国分别制定国家法律,执行指令的要求,反映了它们的立法地位。

与 1996 版国际 BSS 一样,1996 版 EURATOM BSS 的更新

程序也已启动,目的是制定一个修订本,反映新的 ICRP 建议、新的科学数据和执行经验。

经济合作与发展组织核能署

核能署(NEA)在经济合作与发展组织(OECD)中是一个特别机构,是一个工业化国家的政府间组织,成立于 1958 年。它的使命是帮助它的成员国通过在国际合作、科学、技术和法律基础之上,为和平的目的,安全、环境友好和经济地利用核能,保持和加快发展。NEA 担当的角色有:一个分享信息和经验,促进国际合作的论坛;一个帮助成员国分享和维持它们的技术技能的卓越中心;一个基于它的技术工作为政策分析提供便利和形成一致意见的媒介。

NEA 是唯一的政府间核能组织,为了一个相对局限的和技术上的焦点,将北美和欧洲的发达国家与亚太地区聚集在一个小型的非政治论坛。一般地,NEA 提出的主题是具体的,代表当前技术发展水平的技术领域或政策导向领域,由此可以形成国际的和国家的指导文件。与其他国际组织紧密合作来开展工作能够保证它的成果是互补的。

NEA 中,辐射防护与公众健康委员会(CRPPH)负责研究各种辐射防护问题,并采取行动支持国家当局在利用电离辐射时采用和保持高防护标准。NEA 与 ICRP 合作实地检验建议草案对政策、管理和应用的影响并共同发布国际基本安全标准。

其他对辐射防护标准的制定具有贡献的组织

对制定辐射防护标准有贡献的其他组织除了上述国际组织所做的工作外,其他政府间和非政府组织以及网络从业者通过提供反馈信息源也对新标准的建立做出了贡献。这些包括,例如:

- 职业照射信息系统(ISOE):为核电公司和国家监管当局

的辐射防护人员提供一个讨论、促进和协调有关核动力厂工作人员辐射防护的国际合作事业的论坛。ISOE 由 OECD/NEA 和 IAEA 共同发起。

- 国际辐射防护协会(IRPA):提供一个媒介,全世界的辐射防护从业者可以借以更容易的互相交流,并且通过这个过程促进世界许多地方的辐射防护工作。
- 欧洲 ALARA 网络(EAN):仅限于在欧洲推动涉及辐射防护最优化的研究,并促进良好的 ALARA 实践在欧洲工业、研究和医疗领域的宣传推广。
- 西欧核监管者协会(WENRA):作为欧洲主要核安全监管者交流经验和讨论重要安全议题的一个联系网络,以帮助发展实现核安全的一个普遍方法,并对申请加入欧盟的国家进行独立的核安全审查。

2.3 国家管理政策

核与辐射安全管理是一个国家责任,国际标准为此提供协调基础并促进一致性。依赖于管理体系,国家规章可以对工作管理的应用产生不同水平的影响。

虽然核电公司对确保一个特定操作在核安全和辐射防护方面的安全性负有首要的责任,但这也必须在一个合适的管理体系下完成。一个有效的管理体制能够在约定规则与基于表现的规则之间提供一个适当平衡,使得核电公司能够将灵活性融入到工作管理的应用中。为了说明规章对工作管理方法的影响,需要考虑两种类型的规章以及它们之间的关系:核安全法规和辐射防护标准。

核安全法规

尽管所有的核法规旨在保护工作人员、公众和环境免受辐射

照射的有害影响,但这种保护的另外一个方面是核设施的安全和防止核事故。涉及核安全方面的法规可能会赋予许可证持有者特有的责任,这可能影响工作人员的职业照射。例如包括有关系统检查和维护的法规(包括它们的范围和频率),在不同的国家各不相同,而且其灵活性程度也不尽相同。

按照核安全要求执行维修和检查的工作人员的职业照射应该由不断加强的核动力厂可靠性给予保证。根据一个特定系统的安全重要性,一个基于良好性能的电厂工况监视和停堆检修制度可能比规定好的基于预定程序的预防性维修制度具有更大的优势。例如,如果一个检查和维修计划的年频率很高,那么就可能被应用工作管理。在另一方面,降低联合检查的频率和推迟至达到更佳的辐射防护条件时进行检查,比如在系统净化之后,这种灵活性可以减少剂量,允许执行广泛优化的检查和维修程序。

另一个例子,约定俗称的要求是在每一次换料停堆期间进行彻底的蒸汽发生器管道检查,而基于性能良好的规定仅要求根据上一次检查的结果安排未来的检查。后一种类型的规章在满足管理要求保护工作人员和公众的同时,也为核电公司提供了灵活性,可以更显著地优化职业照射。实际上,最近的管理趋势更倾向于标准性能良好型的规定,而非预定的规章,这种趋势支持工作管理的原则。

瑞典和比利时:减少蒸汽发生器检查

在瑞典的 Ringhals 核电站(3 个压水堆和 1 个沸水堆),安全当局(SKI)已经同意,由于压水堆受益于一个蒸汽发生器的更换,新的蒸汽发生器可以每两年检查一次。所有的管道必须在 5 年周期内进行检查,但其中的 50%每两年检查一次。

在比利时,在 Doel 3 和 Doel 4 更换蒸汽发生器之后,每年仅对一台蒸汽发生器打开检查。然而,比利时安全当局在与 Electrabel 协商之后,同意每台蒸汽发生器每六年检查一次。Doel 核电站选择每三次停堆换料期打开两个蒸汽发生器,能够实现两个连续的机组停堆换料不进行一次争取发生器检查。检查覆盖随机抽取的 40%管道样品的整个长度,约 10%的管道检查在滚动过渡区进行。

日本:降低停堆频率

在日本,2007 年之前,电厂执行 13 个月的运行期。2007 年宣布的一个新的检查系统,允许根据每一电厂的维修计划开展维修活动。在这个系统中,检查活动由一个标准的检查转变为根据每个电厂特征的现场导向的检查,允许 18~24 个月的运行期。

美国:反应堆监督过程和“风险警告”检查

美国核管会(NRC)已经着手制定一个新的计划,以提高其管理过程的有效性和效率。这个计划中一个关键方面是 NRC 对核动力反应堆检查方法的改变。这种方法的基础是为 NRC 对核动力反应堆许可证持有者的检查提供风险警告。其基本原则是本着这样的观念:满足管理过程目标和关键属性的许可证持有者的工作表现,可以为维护公众健康和提供合理的保证。形成了七个安全基石,包括职业辐射安全。

例如:NRC 辐射防护检查规程指导检查员对许可证持有者在电厂最具放射性风险的重要区域的有效控制予以关注。这些包括上锁的高或超高辐射区,剂量率可能发生显著变化的区域(例如放射性废物冲洗槽周围)。

辐射防护标准

除核安全法规以外,还有其他的直接针对辐射防护问题的国家标准和导则。这些包括工作人员和公众的剂量限值,以及由官方制定的用于监督现存设施活动的运行限制(比如干预水平或调查水平等)。这类标准和导则的目的是确保防护是经过最优化的,在接近法定限值时,可以采取措防止超过。

涉及工作人员和公众防护最优化原则的标准能够对与职业照射控制有关的工作管理产生一个附加的影响。在执行这个原则时,在为进一步降低常规运行中普遍的极低公众剂量所采取的措施与有可能实现职业照射大幅降低的措施之间,经常存在一个平衡。例如,某些减少流出物工艺的应用,可能导致在安装、运行、维修和退役过程中的增加职业剂量与减少公众剂量所得的利益不相称。因此,对照射结果进行适当的调控以及所作决定征得所有利益相关者的同意是重要的。这是一个定性和定量的过程,最终将适应于每一种情形,以便公众和职业照射都能达到经过仔细考虑的 ALARA。

剂量限值

尽管执行的方式可能不尽相同,但大多数国家规定的工作人员职业照射剂量限值都遵循了 ICRP 导则(1991,2007)、1996 版的国际 BSS 或 1996 版的 EURATOM BSS。

表 1 ISOE 缔约国规定的职业剂量限值(全身)^①

职业剂量限值(全身)	国 家
每单一年份 20 mSv	德国、意大利、荷兰、巴基斯坦 ^② 、罗马尼亚、斯洛文尼亚、英国

① 截止本报告出版时止。

② 特殊情形下执行特别的限值:在监管机构的批准下有效剂量限值为 50 mSv/年,5 年内总剂量不超过 100 mSv。

续表

职业剂量限值(全身)	国 家
20 mSv/年每 12 个连续月	比利时、法国
100 mSv/5 年并且任何 一年中 50 mSv	亚美尼亚、巴西、保加利亚、加拿大、中国、捷克、芬兰、匈牙利、日本、朝鲜、立陶宛、俄罗斯联邦、斯洛伐克、南非、西班牙、瑞典、瑞士
50 mSv/年	墨西哥、美国

对于可能被不同公司雇用或在若干国家工作过的那些外来或临时工作人员的剂量管理,只要信息可以得到,雇主和许可证持有者就必须了解这些工作人员的剂量史。在工作结束之后,那些负责工作人员剂量信息的责任者必须确保将这些人的个人剂量给予记录。

日本:剂量护照

当一个 NPP 必须临时雇用美国员工时(例如雇用有资格的焊接工进行水下焊接),他们将在日本的剂量控制体系下控制这些员工所受的照射,并将这些员工以前的照射考虑在内。如果员工们有他们自己的剂量护照,那么日本公司将接受并完善这个护照。

欧洲:外来工作人员的经历和后续跟踪

大多数欧盟成员国具有外来工作人员的个人剂量记录档案。一些国家还具有全国性的剂量记录系统,可以是仅针对外来工作人员,也可以是适用于所有辐射工作人员,比如法国和西班牙。在西班牙,官方的个人档案不仅包括个人剂量信息,还包括其他信息比如培训历史、医疗监视等。

2006 年,欧洲关于外来工作人员的专题研讨会得出结论:大多数国家都希望有一个更加标准化的外来工作人员个人

剂量记录档案(EAN,2006)。但这并不是要求每一个成员国的档案在内容方面严格统一。就标准化内容而言,一定程度的灵活性被认为是可取的,同时欧洲委员会设置了档案信息的最低要求水平。语言问题也被认为是至关重要的:这样的档案至少要用英文和颁布国的民族语言书写。

ALARA 法规和导则

国家管理当局可以引进另外的关于 ALARA 计划的法规和导则。这种法规和导则可以将重点集中在被许可证持有者采纳以执行系统高效的 ALARA 计划的规程或过程。另外,管理当局在检查许可证持有者的 ALARA 计划中也扮演一个重要的角色。在某些情况下,管理当局可能设定一个集体剂量阈值,如果超过该阈值,正式的或官方的 ALARA 计划程序必须被当局核准。而且,管理机构可以要求外部专家参与,对高辐射工作提出意见和建议。

加拿大、美国:ALARA 基础

在加拿大,辐射防护标准[RPR4(a)]包括一个 ALARA 要求,要求所有许可证持有者建立一个辐射防护大纲,通过执行大量的控制程序,保持辐射的 ALARA,这些控制程序包括:

- 工作实践的管理控制
- 员工资格证书和培训
- 职业和公众辐射照射的控制
- 特殊情况的计划安排
- 核实得到许可的活动所释放的任何放射性物质的数量和浓度

管理机构(CNSC)发布了一个关于 ALARA 的导则(G-129,修订版1,2004年10月),指导许可证持有者为有效控制并将剂量减至最小而采取的行动类型。它概述了总经理明确承诺将剂量限制在 ALARA 量级的重要性,为此目标制订适当计划的必要性,以及定期检查工作相关的剂量以确保它们持续得到充分控制的重要性。在其他行动当中,CNSC 还审视被许可证持有者采纳以维持剂量 ALARA 的过程,作为遵循辐射防护标准第 4(a)部分的证据。

在美国,NRC 法规 10 CFR 20.1101,辐射防护大纲,提出了对 ALARA 的管理要求:

- 每一许可证持有者应该制定、成文并执行一个与许可行动范围和程度相称的以及足够确保符合这一部分条款的辐射防护大纲。
- 许可证持有者应该利用基于正确辐射防护原则的实践方面的规程和工程控制措施,实现职业剂量和公众成员剂量可合理达到的尽可能低(ALARA)。
- 许可证持有者应该定期(至少每年一次)检查辐射防护大纲的内容和执行情况。

法国、德国、韩国、斯洛文尼亚:ALARA 规章

在法国,与职业辐射防护有关的法令(*Décret n° 2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants*)规定:为了应用最优化原则,对发生在控制区的每一次操作,都应该进行职业集体剂量和个人剂量的临时评价,对于运行人员的集体剂量和个人剂量目标应该设定在根据可用的技术和所执行操作的特征所能达到的最低水平。

在德国,法规规定任何即将从事或已经从事产生辐射活

动的个人,都必须保持对人员或环境所造成的辐射照射或污染尽可能低,考虑到当前技术发展水平以及每一个别案例的情况,要求所致剂量低于限值。法规不包含基于经费的任何执行总体最优化的强制性标准。这就允许从最小化和最优化两个角度进行解释。官方的惯例仍旧是以实现“最小化”为目标,然而,VGB已经建议在辐射防护选项的选择中使用成本-效益分析。

在韩国,KHNP公司一直致力于降低职业照射至ALARA水平,并且在过去的20年当中已经取得了显著的进步。即使主要控制要素已经符合管理要求,降低剂量的目标依然通过各种手段在多层次上得以实现。ALARA要求已成为韩国法规中的一部分,过程如下:

- 1958年:建立原子能法;
- 1983年:基于ICRP-9(MPD, MPAD, MPC)的全面修订;
- 1994年:建立ALARA原则;
- 1998年:剂量限值过渡至100 mSv/5年,最大值不超过50 mSv/年(200 mSv/5年到2002年为止);
- 1999年:要求执行ALARA计划;
- 2001年:ALI, DAC概念的应用。

在斯洛文尼亚,核与安全法规引入最优化计划作为关系到辐射防护实践批准的辐射照射评价要求(官方公报NO.115/2003-Sv5)的一部分。

日本、西班牙:监管审查

在日本,当局对要求许可证持有者提交并作为保持职业照射ALARA的基础的运行安全计划进行审查和批准。

在西班牙,监管当局(CSN)在20世纪90年代发布了一

个 NPPs 辐射防护最优化的导则 (GSG-01.12 “Aplicación práctica de la optimización de la protección radiológica en la explotación de las centrales nucleares”-NPP 运行中辐射防护最优化的实际应用)。导则包括 ALARA 体系的总原则, 比如责任的确立、官方档案的必要性和 ALARA 计划的指导方针(指标、目标、培训和管理等)。这些原则在不同机构层次的各种官方文件中得以贯彻执行, 并进行定期修订和评估。

2.4 企业内部规程: 运行限制

作为一个公司内部规程的一部分, 运行限制的设定可以促进个人职业剂量的降低或有助于鉴定可能达到管理剂量限制的工作人员。这种限制也包括剂量约束、剂量目的或剂量目标。必须说明的是, 根据国家体制, 运行人员对这些运行限制使用了不同的术语。“剂量约束”或“剂量目的”通常用于表述在剂量限值之下所接受的最大年个人剂量。导致一个特定行动(控制、通道限制等)的个人剂量水平被称作“调查水平”或“警告水平”。最后, 在某些情况下, 对个人或集体照射也可以设定工作相关的最大水平。这种水平被称作“剂量目标”或者“剂量约束”。这些限制一般在一项工作的准备阶段就已设定, 目的是评估这项工作的最大剂量是多少, 以及在这个水平之下执行防护最优化。它们也可以在工作完成之后用于实际剂量与目标之间的比较。

尽管它们可能以不同的名称提及, 但它们都是被公司用于每日剂量管理的运行值。当在一个新的工序或设施的设计中考虑辐射防护标准时, 它们也可能被用到。在工作管理的意义上, 这些限制为公司提供了在管理限值之内进行个人剂量管理的便利

手段。

加拿大:辐射防护标准和行动水平的确立

在加拿大,总的核安全和管理标准要求许可证申请应包括“为辐射防护标准第 6 章的目的被提议的任何行动水平”(RPR)。RPR6(1)规定“行动水平”是一个特定的辐射剂量或其他参数,如果达到,则表明许可证持有者的辐射防护大纲部分失去控制并将导致采取特殊行动的要求。RPR6(2)规定“当许可证持有者开始意识到在许可证中本条款提及的行动水平已经达到的时候,许可证持有者应该:

- 进行调查,确定达到行动水平的原由。
- 鉴别并采取行动恢复根据第 4 章执行的辐射防护大纲的效力。
- 在许可证规定的时间内通知委员会。”

行动水平是许可证持有者及 CNSC 对任何潜在的控制失效保持警惕的一个重要工具。

此外,一些加拿大公司在它们的辐射防护计划中设置照射控制水平(ECLs)和管理剂量限值(ADLs),以确保当一名工作人员接近剂量限值时,可以采取一个适当水平的管理控制措施把超过管理限值的风险降至最低。

行动水平(组成许可的一部分)要求向 CNSC 汇报。管理控制水平、操作干预水平等都是剂量监测和控制所必需的内部手段,并且通常不需要单独向 CNSC 汇报。两者都是辐射防护中潜在问题的预警指标,都要求后续行动。

法国:运行剂量约束

为了遵守年剂量限值,法国 EDF 公司对经常受照的工作人员执行两种警告剂量水平:i) 预警水平 16 mSv/年(12 个连续月),ii) 警告水平 18 mSv/年。如果一名工作人员达到

了预警水平,就要进行特别监视,同时改善他的工作环境,也可能配合医疗服务,但该工作人员仍然允许进入控制区。如果达到了警告水平,那么该工作人员必须停止在控制区活动,直到采取了后续行动:通知雇主、保健物理人员和医疗服务机构;进行特殊的风险分析以评价该工作人员的未来剂量;雇主做出继续工作的特殊批准。

德国:停堆期间之外所做的工作(Philippsburg 核电站)

如果一个系统失效必须在停堆之前排除,基于电厂安全或技术要求,辐射防护行动计划小组会要求降低电厂功率,并根据区域剂量率评价预定个人剂量。基本原则是,在这种情况下,个人剂量不能超过 1 mSv。

日本:剂量目标

在日本的规章中,职业剂量限值设定为 100 mSv/5 年和 50 mSv/年;全国的核电站还没有超过这些值。然而,核电公司正致力于通过在它们的辐射防护管理中设置一个更低的个人剂量目标值来降低职业照射,比如 20 mSv/年。日本有 66 000 人在核电站工作,从 2002 到 2007 年间仅有 0~3 个人在某一年当中超过了 20 mSv。

罗马尼亚:内照射最优化的剂量控制点(Cernavoda 核电站)

剂量控制点(DCP)是为了控制和限制职业辐射照射而定的一个内部管理限值。它相当于在达到管理限值 18 mSv/年之前任何时候的有效剂量的二分之一。在一个剂量测定年的开始,DCP 设定为 9 mSv,之后随着接受剂量的不断增加而降低。未经电站保健物理专家的批准,在任何一次照射中 DCP 都不能被超过(对辐射区域一个单一入口的单一任务/工作)。

对 CANDU 反应堆,内照射剂量的主要贡献来源是氘化

重水(DTO)。除了总的管理有效剂量限值 18 mSv/年之外,还执行其他的管理控制措施,目的是对吸入 DTO 导致内照射剂量的防护进行最优化:

- 废除 1 mSv 的约束剂量限值:当尿中的 DTO 浓度超过 1.2 MBq/L 时,要求每日送检尿样,被进行尿检的工作人员不允许进入空气中有氚污染的辐射区域,直到浓度降低为止。
- 需要进行氚内照射跟踪调查的调查水平 0.3 mSv:调查由政府部门的 ALARA 协调员进行。
- 即使在氚剂量率未超过强制呼吸防护水平 0.05 mSv/h 时,0.03 mSv 的阈值就先于约束剂量要求使用呼吸防护装备。
- 电站和工作人员的集体剂量月目标。
- 提升电站/工作人员效率的表现指标。

斯洛文尼亚:剂量约束和运行剂量限值(Krško 核电厂)

在 Krško 核电厂,由外照射引起的个人全身剂量的电厂运行限值为 10 mSv/年。如果超过这个限值,必须由辐射防护负责人和技术主管批准。仅有少数从事焊接或放射性废物处置的受照个人稍稍超出了运行限值。

依照斯洛文尼亚法规,电厂已经向当局提出了外照射和内照射剂量约束。这些值被用作批准的剂量约束:

- 外照射的剂量约束,对 A 类工作人员为每年 15 mSv,对 B 类工作人员为每年 6 mSv。
- 内照射的剂量约束为每年 0.2 mSv。

如果超过了这些剂量约束,必须通知斯洛文尼亚辐射防护当局,同时电厂必须采取纠正行动。

2.5 小结

辐射防护的原则和标准建立在国际层面上,为国家层面标准的建立提供了一个良好基础。这些标准通常涉及两方面:1)安全;2)辐射防护。在安全领域,正致力于制定和执行“基于性能”的电厂维修,取代预定的例行维修。这使得维修量减少因而职业照射也相应减少。在辐射防护领域,可以引入特殊的规则以促进辐射防护最优化。除了管理体系以外,核电公司可以制定它们自己内部的辐射防护制度,结合运行限制,管理个人和集体剂量。

3 ALARA 管理政策

ALARA(可合理达到的尽可能低)指一种不断对“是否已采用所有合理措施来降低照射量”提出质疑的思考方式和理念。为了促进这种理念的实际应用,须成立专门的组织,考虑 ALARA 和拟应用的通用规则合理分配个人与集体的责任。

3.1 概述

ALARA 方法通常对以下问题提出质疑:是否已在主要情况中采用最佳措施,是否已采用所有合理措施来降低剂量(ICRP, 2007)。与实施任何其他倡议一样,ALARA 管理的成功取决于组织最高层领导的鼓励与支持。电厂管理层必须建立相应的管理机构或组织,以确保所有工作均合理地考虑了辐射防护问题。电厂管理层尤其需从政策上和资金上给予支持,并建立跨学科协作的方法以完成其计划、进度安排、实施和跟踪。尽管这样的机构因国家、因公司而异,但其有许多相同的关键点,本章将讨论这些共同点。

3.2 核动力厂 ALARA 大纲

所有核动力厂都应遵循“ALARA 精神”,制订并执行“ALARA”大纲,该大纲表达了管理层对适当地实施辐射防护措施的承诺,应确定行动目的,描述实施过程所必需的具体机构、程序和工具。一般包括以下方面:

- 工作目标和指标的确定,例如,确定年度、大修和具体工作的集体剂量指标;
- 确定为实现工作目标可以利用的资源;
- 责任分配;
- 对“ALARA 委员会”的作用和功能的描述;
- 对辐射防护机构的说明(大修协调、具体的辐射防护工作组等);
- 培训/教育政策;
- 对工作准备、执行和工作后分析的方式方法的要求与建议;
- 衡量 ALARA 工作成功与否的方法;例如,一个能够及时、定期地向管理环节上下反馈工作计划的目标与指标实现状况的监督体系;
- 当反馈信息显示计划失败或存在缺陷时,采取必要的纠正行动的措施。

俄罗斯联邦:标准 ALARA 大纲

2000 年,Concern Rosenergoatom 要求俄罗斯所有核电厂启动 ALARA 大纲实施工作。2000 年全俄核电运行研究所(VNIIAES)详细阐述了适用于所有核电厂的标准 ALARA 大纲。该大纲的主要内容如下:

- a) 核电厂的 ALARA 组织机构:
 - ALARA 委员会;
 - ALARA 小组,主要任务和功能:工作分析、工作准备、实施和反馈等。
- b) 旨在减少职业照射活动项的标准大纲,包括:
 - 有组织的活动;
 - 降低源项;

- 减少时间。

每个核电厂根据标准 ALARA 大纲,制定更详细的大纲。例如,Kalinin 核电厂的大纲包括以下具体内容:

- 剂量目标;
- 组织机构;
- 实施大纲的责任的划分;
- 正常运行及大修时减少职业照射的措施;
- 剂量计划、分析和记录程序;
- 减少剂量的特殊设备;
- 员工培训;
- 剂量大于等于 $1 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ 的工作清单,并应对这些工作进行优化以减少照射。

3.3 职责与责任

所有工作人员和管理人员都必须承担自己活动领域内实施 ALARA 计划的责任。

管理层的参与和支持可以体现出管理层的承诺和责任。管理政策应鼓励管理人员经常考察工作现场,获取项目情况和问题的第一手资料。考察电厂时应有明确的目的或关注某一领域(例如,操作、清洁、程序执行情况,工具准备情况、某一具体维修任务进度等)。管理人员可进行适当的分权分责,从而节约其考察电厂的时间。

此外,管理政策可要求在规定的限值(剂量、工时、时间等)内完成工作任务。该内容可通过承包合同要求,管理层的资源保障—满足给定目标所需的经费和人员。并向所有工作人员传达这些目标及管理层的承诺。

电厂所有职能部门均须对 ALARA 负责,通常包括:

- 电厂厂长:负责 ALARA 实施,包括建立内部标准;
- 化学:化学规范、停堆操作关键点等;
- 运行:执行化学方面的建议,使电厂化学指标满足化学规范要求;按 RP 要求维持水位等;
- 维修:去除异物、工具及作业区准备、模拟培训等;
- 辐射防护:给管理人员和其他工作组提出 RP 建议,建立标准体系,法规标准的有效执行等;
- 工程支持:基于操作经验最大限度降低维护要求等;
- 计划和控制:了解工作安排与电厂配置的关联性,分析偏离计划对 ALARA 的影响,等等;
- 大修保障:对大修时的后勤保障负责(与正常运行完全不同);
- 设施管理:如整备和清洁;
- 承包商。

应当注意:履行上述职能的组织机构因公司而异,因运行工况而异(正常运行和停堆大修)。因此,很难详细说明什么是“最佳”的职责分配。通常根据运营电厂大量的经验制定一些通用规则,以下章节会进一步阐述该问题。

英国:管理层职责

在英国,法律要求雇主任命足够数量的合适的人员担任辐射防护主管。这些人员需对雇主负责,确保工作人员遵守电厂辐射安全相关条例。为确保有效性,这些主管必须拥有相应的权力和丰富的专业知识,熟悉执行的任务,了解确保剂量满足 ALARP(合理可行的低)的辐射防护要求。在 Sizewell B 电厂,每位一线主管(运行、维修等)都被任命为“辐射防护主管”,他们需参与向其团队传达“辐射工作许可

证”制度,确保团队人员遵守相应规则等工作。此外,监管当局提请所有电离辐射用户;管理层必须主动参与 ALARP 推进工作,参与影响职业照射的决策。

ALARA 责任分配

尽管责任分配可能因国家和公司而异,但以下分配原则通常可参考使用。

对于大型公司,ALARA 职责集中在公司法人层面,其职责通常包括:

- 建立 ALARA 总体原则;
- ALARA 政策与程序标准化;
- 建立进行剂量减小及优化的通用行动;
- 为整个公司或每个电厂(若适用)设立短期(3 个月到 1 年)、中期(1~5 年)和长期(如 10 年)剂量目标;
- 独立审查小组,负责详细审查重要部件更换工作(如蒸汽发生器或反应堆容器顶盖);
- 全公司共享 ALARA 专业知识与经验;
- 针对新设施设立剂量目标。

此外,各公司通常会针对 ALARA 的组织机构分配以下责任(在实际应用中会有差异和变化):

高管层必须推进 ALARA 大纲并为其提供各种资源和支持,以确保获得全面成功。

电厂厂长(经理)依据公司的政策与目标(某些情况下,电厂可以细化政策与目标),对 ALARA 大纲负总体责任,包括:

- 参与设立核动力厂 ALARA 大纲目的和指标;
- 为电厂员工进行辐射防护措施的实施提供支持,尤其是辐射防护管理人员;
- 确保电厂各级之间沟通渠道畅通;

- 审查电厂在减小照射方面所做努力的情况。

部门经理在其负责的活动领域内负责实施电站的 ALARA 大纲,并确保按照 ALARA 程序执行相应工作。其责任如下:

- 确定本部门对电站 ALARA 大纲的责任;
- 确定本部门的剂量目标;
- 检查和生效为达到目标而制定的程序和方法;
- 支持本部门成员实施 ALARA 原则的活动;
- 对照 ALARA 大纲目标,定期评审本部门的执行情况。

辐射防护经理负责制订和实施辐射防护大纲,并且必须具有“向上层领导反映问题”的权力,以解决辐射防护相关的问题。其责任如下:

- 建立实施 ALARA 原则的方法与程序;
- 鉴别可能产生重大辐射照射的工况与操作(包括风险);
- 实施照射控制计划,并向其他部门提供反馈数据(辐射数据、照射水平等)。
- 实施电站辐射防护初始培训,并根据电厂培训大纲组织复训。

辐射防护技术人员在现场对以下操作负责,协助工作人员保证辐射防护政策的落实,及工作按 ALARA 原则实施。其责任包括:

- 向工作人员提供帮助和建议,以促成他们的 ALARA 行为;
- 跟踪工作过程以确保工作人员遵守安全与辐射防护程序;
- 在某些电厂,当发现严重违反剂量目标或工作人员接受的辐射风险显著升高时,有权要求停止作业。

最后,每个**工作人员**通过参加辐射防护培训、遵守相应程序、向管理层提出降低照射的建议,以保持其所受照射符合 ALARA 原则。具体而言,其责任为:

- 通过应用合适的辐射防护程序和方法,使个人及与其一同

工作的其他人员的受照剂量保持在可合理达到的尽量低的水平；

- 提出和建议降低照射剂量的改进措施和良好的做实践。

公司和承包商之间的 ALARA 责任划分

公司和承包商之间须针对 ALARA 的实施清楚地界定彼此的责任。电厂业主公司通常须对工作环境负责。如果承包商使用的是业主的工作程序,则公司须对工作层面的辐射防护优化负责。另一方面,如果承包商制订自己的程序,则承包商负责向业主公司证明已进行防护优化。在某些情况下,可以针对辐射防护执行在合同中给出具体要求。在任何情况下,业主公司与承包商之间的互动是改进辐射防护的关键因素。

法国:EDF 的承包商

对国有的承担全国核动力厂维修业务的承包商,EDF 在合同中引入了与辐射防护相关的具体责任。这些合同包括一份固定工作任务清单,一份可能附加的“可选”工作任务清单。如某个承包商没有履行合同中指定的责任,或在辐射防护方面执行不力,则不再将“可选”部分工作任务承包给该承包商。

斯洛文尼亚:承包商责任(Krško 核电厂)

鉴于承包商的 ALARA 责任,有效管理政策是在商业合同中引入 ALARA 责任。在 Krško 核电厂,如果因不符合 ALARA 要求而导致了高集体剂量活动,承包商可能要向核电厂支付罚款。如果总剂量比 ALARA 计划剂量高出 $10 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$,承包商必须支付的金额为:€ 10 000,且总剂量每增加 $5 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ (与 ALARA 计划剂量)再多支付€ 5 000。双方在最后一次会议中商定罚款支付方式。在这种情况下,电厂设定的 α 值用于合同商务,以迫使承包商对 ALARA 承担相应的责任。

3.4 ALARA 委员会和其他特定的 ALARA 组织

依据公司的组织机构情况,可在不同级别设立 ALARA 委员会:公司级、工程部级、电厂级等等。对于管理着大量电厂的公司而言,为了贯彻公司 ALARA 政策的主要目标,并在电厂间协调辐射防护措施,设立公司级 ALARA 委员会是非常有益的。该委员会通常由 RP 最高管理层的代表担任主席,其成员通常为电厂最高管理层的代表。一些公司级的工程部也可以设立 ALARA 委员会,以便协调将辐射防护融入工程中(如电厂改造或特殊维护维修等)。

电厂 ALARA 委员会

某些公司设立了电厂 ALARA 委员会,以持续进行跨专业的规划和 ALARA 大纲审查。该委员会通常由电厂最高管理层的代表任主席,以确保决策能力,其成员通常为电厂各部门,包括辐射防护、化学、维护、运行、工程、计划、服务部门等的代表。

该委员会通常负责审查和批准电厂经理提出的 ALARA 大纲,确定年度职业照射剂量目标,确保大纲有效地实施。ALARA 委员会应定期开会,以审查电厂 ALARA 执行情况,评价降低个人剂量的建议,并就 ALARA 大纲的有效性向管理层提出建议。

每次委员会的会议纪要中都应明确由谁负责落实委员会决定采取的每一项行动,会议纪要应分发到所有部门。

可以就某些维护工作的 ALARA 计划向电厂 ALARA 委员会咨询。通常根据该工作的预期个人或集体剂量水平,决定是否提请委员会讨论;在选择最佳防护措施时需要进行调解时,可提交委员会(参阅第 3.5 节)。

ALARA 工作组

为了便于采用符合实际的方式实施 ALARA 大纲,创建一个

由辐射防护专业人士和工程师组成的 ALARA 专业工作组是非常有用的。该组的职责包括参与工作计划、安排和会议准备,审查工作程序、临时屏蔽设计等。

韩国:ALARA 组织和责任(KHNP)

为满足法律要求实施的 ICRP-60 建议(1998),KHNP 修订了其 ALARA 大纲,并于 2000 年制订了标准 ALARA 程序,这些标准程序适用于所有电厂(在此之前,每个电厂应用的是早期的 ALARA 程序)。标准程序阐述了 ALARA 委员会和 ALARA 实践委员会的组织和责任,如下所示。

职务	ALARA 委员会	ALARA 实践委员会
主席	电厂经理	辐射安全经理
秘书	辐射安全部门经理	辐射防护组组长
成员	电厂副经理、QA 经理、所有电厂级的经理、分包商经理	工作组组长、分包商工作组经理、辐射服务分包商经理、主席推荐的成员

ALARA 委员会负责对 ALARA 大纲进行审查(RP 政策、年度目标、ALARA 长期战略等)。依据预期工作剂量,两个委员会对以下内容负责:

- 审查辐射防护最优化计划;工作后 ALARA 审查(如果实际剂量超过预期剂量 25%);
- 审查辐射安全控制计划;
- 审查辐射防护最优化计划(主席要求时)。

德国:因 OSART(Phillipsburg 核电厂)而成立了 ALARA 委员会

2004 年进行的 OSART 审查结果表明有必要成立 ALARA 委员会。该委员会针对停堆准备以及年度大事回顾,每年举行两次会议。ALARA 委员会成员包括电厂管理

层、电厂运行人员以及特定部门(如维护和运行)的负责 RP 的人员。该委员会成功创建并成为电厂管理层的重要联络组织。可以介入并确定一些重要的辐射防护准备工作。这意味着将会开诚布公地讨论和分析最新项目和有潜在隐患的项目。同时委员会鼓励自发讨论辐射防护议题。

罗马尼亚:ALARA 文化(Cernavoda 核电厂)

在 Cernavoda 核电厂,ALARA 文化包括以下内容:

- 工作组 ALARA 协调员:
 - 分析其工作组的剂量月报(相对剂量目标所接受的剂量,重要作业/活动接受的剂量);
 - 参与发布和跟踪工作组 ALARA 目标与指标以及降低剂量的计划。
- ALARA 技术委员会责任:
 - 对预计集体剂量 > 20 人 \cdot mSv 的活动/作业进行 ALARA 评价。
 - 分析建立自评程序的活动。
 - 设立 ALARA 具体目标。
 - 分析剂量相关指标的变化。
 - 收集、分析和评价用于确定 ALARA 流程效果的数据;ALARA 代价利益分析。
 - 评价和批准降低工作组辐射照射的行动计划。

ALARA 委员会批准 ALARA 目标,并对 ALARA 指标进行趋势分析,如果必要,还需确定纠正措施、修改目标。

ALARA 目标包括:

- 电厂和工作组集体剂量(人 \cdot mSv/a)。
- 计划停堆大修的集体剂量(人 \cdot mSv)。
- 重要作业集体剂量(人 \cdot mSv)。

- 电厂内集体剂量(电厂集体剂量的百分比)。
- 工作组内集体剂量(工作组集体剂量的百分比)。

美国:ALARA 工作组

在美国,ALARA 工作组通常包括几名保健物理师和技术人员,他们分别开展 ALARA 例行审查和履行剂量计算职能。小组每年通常履行 200~300 次 ALARA 作业审查,向 ALARA 委员会推荐年度及停堆大修集体剂量目标,管理剂量数据库、远程监测系统、电子遥测剂量监测系统和机器人技术;并负责永久及临时屏蔽的设计。该小组应参与工作计划、进度安排和准备工作等各阶段的工作,以确保采用了适当的辐射防护措施。例如,维持管道中的水位,以实现屏蔽效果。

3.5 ALARA 审查

ALARA 审查通常由 ALARA 工作组执行(如果已建立该组织)。无论组织机构状况如何,均应由与接受审查的特定工作相关的技术专家和辐射防护人员组成的跨专业团队进行此类审查。

在将 ALARA 原则应用于具体工作时,不同的工作需要进行不同级别的审查。由于与工作相关的辐射风险不同,出于减小剂量目的而进行的工作审查力度会有所差异。通常要建立剂量标准,它既要确定工作力度,也要规定必须获得什么层次的批准方可开展工作。这些标准通常采用如下格式:如果工作的个人剂量预计水平和/或集体剂量预计水平超过了某个点,则需要审查和批准。

在选择减少辐射照射措施时,诸如代价利益分析等决策辅助技术通常很有效。使用此类分析意味着要采用单位集体剂量对应的参考币值(所谓的“ α 值”)。多数情况下,只有在需要考虑预

算以及运行或设施安全性上有影响时，“ α 值”才被视为特别重要的决策依据。因此该值用作“决策辅助工具”，而不是“决策工具”，以减小决策过程的主观性。

多数情况下，该值只不过是众多标准之一而已。但是，即使决策辅助技术的结果仅仅是决策过程中的一个标准，此类技术可让用户更好地组织问题，识别决策标准，量化所需的不同要素（集体剂量、个人剂量分布、辐射防护技术的有效性等），同时也增加了决策过程的透明度。

比利时、法国：按预期剂量进行作业分类

在比利时的 Doel 核电厂，必须准备一份 ALARA 文件，其详细程度取决于集体剂量和剂量率：

- 环境剂量率 $< 0.1 \text{ mSv/h}$ (且接触剂量率 $< 0.5 \text{ mSv/h}$) 和/或集体剂量 $< 0.5 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$: 无详细准备文件。
- 环境剂量率 $> 0.1 \text{ mSv/h}$ (或接触剂量率 $> 0.5 \text{ mSv/h}$) 和/或集体剂量为 $0.5 \sim 5 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$: 准备 ALARA 文件，其中要列出详细的计划剂量和需要实施的辐射防护措施一览表。
- 集体剂量为 $5 \sim 25 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$: 必须召开由专业人士与辐射防护人员参加的会议，共同准备该 ALARA 文件，该文件必须由辐射防护人员确认。
- 集体剂量为 $> 25 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$: 上述程序外加 ALARA 委员会会议，以确定旨在减小集体剂量的措施。

在法国，EDF 建立了内部辐射防护规则，其中一章涉及辐射防护优化问题。必须准备 ALARA 分析，其详细程度因集体剂量、剂量率或污染水平而异。所有 EDF 电厂采用相同的集体剂量与剂量率参考值来确定级别。污染水平由各电厂自定：

- 0 级: 环境剂量率 $< 0.1 \text{ mSv/h}$ 和/或集体剂量 $< 1 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$; 无特定优化需要研究; 标准规则的应用即足够。
- 1 级: 环境剂量率为 $0.1 \sim 2 \text{ mSv/h}$ 和/或集体剂量为 $1 \sim 10 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$; 由作业策划人员进行“简化的”ALARA 分析;
- 2 级: 环境剂量率为 $2 \sim 40 \text{ mSv/h}$ 和/或集体剂量为 $10 \sim 20 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$; 作业策划人员和保健物理部门一同进行深入的 ALARA 分析;
- 3 级: 环境剂量率 $> 40 \text{ mSv/h}$ 和/或集体剂量 $> 20 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$; 由保健物理部门负责并与作业策划人员共同进行深入的 ALARA 分析。该分析应包括对几种防护措施的比较选择, 并得到电厂 ALARA 委员会认可和接受。

韩国: 币值模型

在“2007 年度 ISOE 亚洲 ALARA 研讨会”上, 韩国核安全研究所(KINS)提出了一个新的币值模型。它们调查了全世界核电厂使用的“ α 值”以及法国(CEPN)、英国和日本的模型。他们将这些模型与 KINS 模型进行了比较, 并开发出一种考虑了社会和经济因素(如国内生产总值和预期寿命)的新模型。

罗马尼亚: 辐射活动预评价(Cernavoda 核电厂)

在 Cernavoda 核电厂, 所有涉及辐射照射的活动都要依据核电站程序, 从辐射防护角度进行评价。基于要执行的活动的详细信息, 进行集体剂量的估算。如果估计的总剂量超过了预定限制, 核电厂 ALARA 委员会将进行进一步的评价, 以便建立旨在实现集体剂量与辐射影响最小化的补救措

施。如果估计的总剂量超过了 $10 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$, 则相应的安全工作计划被批准执行, 并采用所有必要的补救措施, 例如, 热点屏蔽, 作业前模拟操作, 或限制使用呼吸防护装置以实现外照射剂量最小化, 从而减少个人及集体剂量。

对于每次计划停堆, 基于以前的维修经验评价相应的活动并估算剂量。如以前没有经验反馈, 则基于辐射场测量值进行工作前评价, 再采取必要的防护措施。对于估计的集体剂量大于 $0.1 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ 的活动, 不仅给予辐射工作许可号, 还将在工作期间进行密切监视, 以确保工作人员遵守了既定防护措施, 集体剂量符合预计趋势。否则, 将在必要时及时采取纠正措施。

3.6 电厂 ALARA 导则

在为电厂 ALARA 活动提供支持的过程中, 一些公司制定了内部辐射防护导则, 其中包括 ALARA 实施建议。此外, 一些企业团体, 如核电运行研究所 (INPO) 和核能研究所 (NEI), 基于其成员的经验也制定了类似的导则。

法国: EDF 内部要求

在法国, EDF 制定了“辐射防护参考体系”, 其中有 8 章列出了辐射防护方面的监管要求和 EDF 内部要求。其中一章专门介绍了辐射防护最优化, 以及预期剂量的评估方法、运行期间剂量跟踪方法和经验反馈分析方法。另一章专门介绍了辐射防护管理, 列出了电厂组织机构要求 (建立 ALARA 委员会, 任命一位经理为员工提供指导并负责辐射

防护事务等等)。此外还制定了有助于实施这些要求的其他导则。

日本:ALARA 运行安全大纲理念

日本公司在其运行安全大纲中阐述 ALARA 精神。公司据此通过其内部目标努力降低照射,如 20 mSv/年(监管限制为 50 mSv/年)。

美国:INPO 导则

在美国,自三哩岛事故后,由 INPO(1979 年由核工业创建)负责核能企业的执行与评价。所有经营商用核动力厂的美国企业都是 INPO 成员。INPO 的使命是“促使核动力厂运行于最高安全性与可靠性,追求卓越”。为此,INPO 发布了“核电厂辐射防护导则”,以帮助企业实施和维持高标准的辐射防护,并实现集体剂量目标。INPO 同时也负责研究制定业绩指标。

辐射防护使用单一指标:即每个机组的集体剂量目标。INPO 要求各核动力厂每五年确定他们预计能达到的目标(年度目标和 5 年目标)。之后 INPO 平均各电厂的“预计值”,为 BWR 和 PWR 设立 5 年剂量目标。核行业首席执行官负责设立这些目标,以便核电厂自己拥有目标确定权。该目标按年度进行跟踪,以衡量企业在实现目标方面的进展情况。值得注意的是:当 INPO 根据电厂年度集体剂量对各电厂排名后,业绩指标指数低于剂量目标的电厂会受到惩罚。业绩指标指数由十个指标组合而成,用于衡量电厂总体业绩。INPO 希望通过这种方法使电厂绩效不断提高。

3.7 小结

为了让管理环节的每一个级别,从公司领导到基层员工,都能了解 ALARA“意识”,需要组织制定 ALARA 大纲,该大纲须设定明确的辐射防护最优化目标。并就 ALARA 大纲实施的责任,对各管理层和专业工作组进行明确的分工。成立 ALARA 委员会或其他类型的 ALARA 专门组织是关键所在,该组织将成为 ALARA 实施工作中主要人员的“集合点”。这样有利于他们参与 ALARA 大纲,有利于细化 ALARA 计划。

4 工作人员的参与和效能

没有工作人员参与,就无法实现 ALARA。接受照射的是工作人员,因此要降低照射,在很大程度上要依靠工作人员自己。通过促使工作人员在每个工作阶段(从计划到作业后评估)很容易地参与进来,可以提高工作人员的主动性和效能。为实现此目标,最高管理层也必须致力于此过程,承担相应责任,建立相应的机制,鼓励并考虑工作人员的反馈。

4.1 简介

工作人员的参与和效能会影响一项作业的许多环节。工作人员的效能受很多因素的影响,通过工作人员的参与可以使其效能得到支持或提高。如果能提高工作人员对其所承担任务的兴趣,就更有可能激发其在执行任务时发挥他们的最佳水平,从而达到低剂量、高质量的作业效果。

考虑到工作人员存在不同的级别,因此本章中的很多观点对所有级别的人员都是适用的,包括最高管理者、高层领导乃至部门经理、班组长和工人。

4.2 影响 ALARA 实施的工作人员效能

有效管理工作人员照射所需的大量操作知识取决于工作人员自身。通过应用良好的工作管理实践,在提高工作效率的同时,可以降低照射。为了在某项工作中利用工作人员的知识与经

验,首要的是让其积极参与决策过程。优秀的工作人员通过高质量、低剂量且在进度计划和预算范围内完成其作业,从而使剂量降低。建立相应的机制也是必需的,以允许并鼓励工作人员提供反馈。

鉴于某些更重要的因素会影响工作人员的良好效能,工作人员应当:

- 接受过良好的技术方面教育和培训;
- 了解并将辐射防护的良好实践应用到工作中,包括实际应用 ALARA 原则;
- 按分工进行工作和团队合作;
- 在作业准备、作业实施和作业后评估期间,利用自身经验评价须执行的工作,并努力在程序要求范围内提高绩效;
- 利用自身的经验提出新的工具设计方案,或提出对现有工具、装置或相关部件的改进方案;
- 识别潜在问题,能够以安全有效的方式对出现的意外问题做出反应;
- 利用信息交流平台(内部和外部),来确保他们的知识、经验及教训能够让其他工作人员分享和使用。

激励良好行为的一个重要基石是个人积极性。因此,员工的积极性在工作人员参与中是一个关键因素。

4.3 实施 ALARA 原则的教育和培训

在 ALARA 实践的工作人员参与方面,教育要解决的是辐射防护中概念和良好实践问题,并告知工作人员其保持照射“合理可行尽量低”的职责。该教育必须针对不同类型的工作人员及其所应承担的职责。例如,针对经理们的培训课程,可以概述实施 ALARA 大纲的重要性和正当性、其基本原则以及评价其效果的

程序。相反,针对工作人员的培训,内容应当全面,着重于基本的 ALARA 的原则和实践、角色和职责的分配、各类放射性防护的工具(电厂控制文件、作业前和作业后的评估、剂量降低技术等)以及处理意外事件的导则。

对于所有工作人员而言,即使没有直接在照射区域工作,了解辐射防护因素及其责任范围内的特定影响都是非常重要的。例如,维护人员必须了解工作条件对照射持续时间的影响,进而当他们确定新工作程序或开发将用于限制区域的工具或穿戴防护服时,应当考虑这些因素。

应定期进行 ALARA 复训,例如,在停堆检修前安排复训课,以告诉或提醒工作人员在工作中辐射防护及其实施的重要方面。在培训中应特别关注:

- 尚未完全熟悉 ALARA 方法的新员工;
- 考虑在最近的培训课上、特别是从参与者的评价与建议中所获得的以往的经验;
- 提供与要执行的工作相关的信息。

STAR 自评流程

采用 STAR 自评方法的培训,也有利于工作人员在工作过程中实施 ALARA,减少错误、事件和事故的发生,并避免不必要的剂量和人身伤害。该技术对工作人员要求如下:

S:停——执行某项任务前停一停,以识别正确的要素;

T:想——想一想任务、预期效果,以及未出现该效果时需要采取的措施;

A:行——再次确认正确的要素、履行预期职责,开展行动;

R:评——通过比较实际效果与预期效果进行评价。

STAR 流程广泛地应用于核工业界,并可通过对某项任务是否得到安全执行的确认有效地纳入综合安全管理系统。

加拿大:辐射防护技术人员继续教育 (Pickering B 核电厂)

在 Pickering B 核电厂,保健物理部启动了一个面向辐射防护技术人员的继续教育计划。在每次轮班开始时,安排一名保健物理工程师在工前会上讲述相关内容并答疑。

该计划具有 3 重好处:所讲述信息是辐射防护培训的延伸;向新老员工传递了新信息;为辐射防护技术人员提供了与核电厂保健物理工程师定期碰头的机会。这种沟通/互动对于日积月累提高辐射防护服务的效能是必不可少的。

立陶宛:Ignalia 核电厂的培训计划

Ignalia 核电厂认识到对工作人员进行适当的培训和教育是强化辐射安全文化的一个因素。该电厂依据《立陶宛共和国卫生部长令 (Order of Minister of Health of the Republic of Lithuania)》中的要求,组织对厂外工作人员辐射防护方面的培训和教育,培训频率为 5 年。对 Ignalia 核电厂工作人员制定的培训计划也适用于厂外工作人员。该计划已获得辐射防护中心的批准,课时约 30 小时。

罗马尼亚:工作人员辐射防护培训

核电站员工根据其工作性质和要求取得相应的辐射防护资质。资质分为四等,分别对应于不同的技能要求和责任,每种资质的人员都要求每 5 年参加一次复训,这些资质如下:

- 红色:未培训人员,没有特别批准,不能参与或执行辐射工作。
- 橙色:接受过基本辐射培训,并须获得初次进入任一辐射控制区及在这些区域进行工作的授权。如没有辐射防护助理,则此类人员不得在控制区中的 1 区工作。

- 黄色:具有丰富的辐射防护理论知识,但实践经验有限。无需任何助理,此类人员可以执行辐射工作。
- 绿色:具有丰富的辐射防护知识和实践经验的辐射防护人员。他们也可作为红色或橙色资质人员的辐射防护助理。

4.4 影响工作人员参与的因素

工作人员参与的重要先决条件是积极性,前面讨论的各种因素和行为方式要求核电企业提供条件并形成惯例,鼓励并保持电厂工作人员和承包商参与的积极性。从长远来看,可提升全体员工的绩效、优化辐射防护。

管理层职责

为了让工作人员充分参与辐射防护优化工作,重要的是让他们看到各级领导都致力于 ALARA。管理环节的所有成员都应用工作管理来改善电厂业绩,这一点也很重要。如果管理层不关心工作管理的实施或 ALARA 原则的应用,就很难激励一般工作人员应用这些方法。因此,高级管理人员是工作管理和工作人员参与方面一个重要的“桥梁”。他们的具体职责应当是:激励工作人员,鼓励他们提供反馈,并向最高管理层报告。让工作人员看到他们并不是 ALARA 流程的唯一参与者,而且管理层会聆听他们的建议,这一点非常重要。

由于大多数停堆检修的工作通常由承包商完成,因而让承包商员工参与工作管理和辐射防护活动也同样很重要。在管理方面,必须说明以下两个方面的问题:

- 承包商管理者应让其工作人员参与工作管理和辐射防护活动;

- 电厂管理者应当：
 - 在停堆检修工作中支持承包商工作人员的参与；鼓励承包商在工作管理和 ALARA 方法上的合作；
 - 评估承包商对工作管理和辐射防护的态度。

法国：组织电厂经理访问基层

为了方便经理对基层的走访并提高走访的效率，某些 EDF 电厂制订了针对经理们的访谈指南。该指南是一份检查表，根据电厂所使用的参考辐射防护导则，列出了电厂经理应当控制的要点。为确保经理对这项活动投入足够的时间，电厂制订了年度访问计划。

员工参与计划、准备和 ALARA 审查

通常执行具体工作的人员对工作最为了解，也最有能力提出改进工作、减小剂量的建议。为了利用这些操作经验，应让工作人员在工作计划和准备阶段参与进去。这有利于改进工作程序、进度计划、拟采用的工具和技术方案，并有利于工作执行时的协调。通过作业后评价与经验交流(网络平台)，以及在可能的情况下通过在某项特定作业期间的指定阶段(如：控制点)提供反馈，工作效能可以从员工经验中获益。当工作人员认为自己的知识和经验有价值，并被分享和利用，也会提高他们的积极性。辐射防护“意见箱”是收集工作人员经验的另一种工具，如果能向提意见者系统地提供反馈，“意见箱”也可成为有用的激励工具。

在承包商执行的多数作业中，由于在工作开始前工作人员通常并未到过作业现场，因此这些工作人员参与计划与进度安排的可能性在某种程度上是有限的。尽管如此，必要时还是应当让这些工作人员参加作业/任务的专项培训和作业后的总结评价，以便获得并利用他们的反馈。这可能需要电厂管理者同意为承包

商的评价时间付费。

日本:反应堆冷却剂泵检查 (Ohi 核电厂)

在关西电力有限公司(Kansai Electric Power Co. Inc.)的大饭(Ohi)核电厂,建立了由关西的辐射控制与维护部、制造商和检查承包商组成的 ALARA 工作组,以降低反应堆冷却剂泵(RCP)检查活动中的辐射剂量。该工作组涵盖了 RCP 系统检查的各个方面,包括设备设计、检查活动和行政管理。ALARA 工作组组长可由一位电厂管理层成员担任。

基于约 50 个参与 RCP 检查活动的工作人员的调查问卷,采用因果图的方法分析了导致高剂量的主要原因。将这些原因进一步细化,从而制订 ALARA 措施。从降低剂量效果和成本效益角度,对所建议的措施进行了评价,选择出最有效的措施如下:

- 去污箱引入超声波清洗单元;
- 增强 RCP 检查室的屏蔽(热室);
- 叶轮屏蔽箱;
- 改进内部构件升降装置;
- 引入自动化电气工具;
- 加强培训。

信息和沟通

应定期向工作人员通报管理层确定的 ALARA 大纲目标,并应尽快答复相关问题。这可以通过定期信息单、声明、公告,或视具体情况采用诸如信息讨论会的方式来达到此目的。如果设定的目标针对某一具体工作,则应让从事该项工作的员工了解该目标的进展情况,例如,定期发布表、图和工作结果等。

在任务执行之前,由任务经理和/或辐射防护人员组织召开

一个简短的工作人员情况通报会是非常有用的，可以提醒工作人员注意作业的剂量目标以及作业的主要特征。停堆检修的实时剂量的测量结果应该在“显眼”的地方显示，例如，警卫室、反应堆厂房的入口或更衣室内。停堆检修剂量和作业时间表也可以在停堆大修换班移交报告上给出，并在每次换班会议上进行讨论。为了强化工作人员实现大修目标的动力，还可以增加一些重要信息。不过，必须注意，应确保这些信息不会被理解为检查效能或质疑资质。

不同级别员工内部及不同级别之间的沟通、信息传递和经验交流，都将有助于辐射防护程序的实施。电厂和承包商员工之间的沟通尤其重要，因此在必要时让电厂员工加入到承包商工作团队中是很有价值的。

法国：每日剂量显示和面向承包商的宣传册

在法国，所有工厂都把每天停堆大修的实际集体剂量与预计集体剂量的变化都显示出来，这种做法很受工作人员欢迎。这些显示通常提供以下相关信息：

- 工作事故数量；
- 重大辐射防护事件数量；
- 内部或外部个人污染的数量；
- 当天主要事情。

EDF 还为承包商制订了不同的指南，汇总了核动力厂应用的安全与辐射防护规定：

针对所有承包商的国家级指南（涉核场所进入条件、安全与辐射防护规定、分区的变化、强制性辐射防护教育等）。

针对某次大修由各电厂制订的本厂指南（包括厂址地图、电话号码、相关实用工作机构的常见问题解答、报警信号、安全、辐射防护和环境规定、大修流程图和计划等）。

罗马尼亚:业绩指标-集体剂量和剂量记账 (Cernavoda 核电厂)

为了提高岗位和工作组的业绩,Cernavoda 核电厂制定了与电离辐射及放射性物质相关的电厂业绩指标,包括:i)集体剂量,ii)内照射剂量(占集体有效剂量的百分比),iii)向监管部门报告的环境事件数量。这些指标每半月、每月或每季度评价一次。

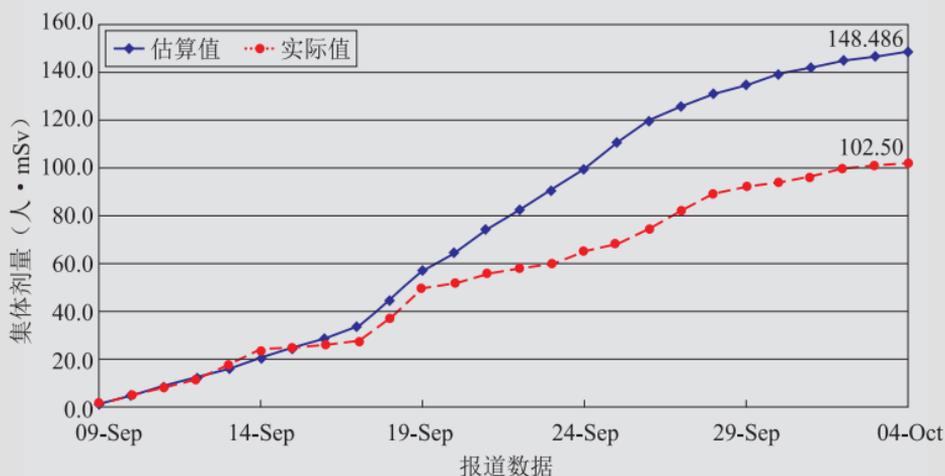
通过在电厂重要交通区域发布各类信息,岗位和剂量受照者的辐射防护意识得到提高,这些信息的类别包括图表、公告、辐射防护岗位目标的简讯、ALARA 倡议、RP 政策和程序等。此外,在计划停堆大修前,辐射控制人员会评价涉及放射性风险的所有工作计划。针对每项任务和整个大修计划,设定外照射集体剂量目标值。每天的计划停堆检修信息都采用以下图形和报告的形式来印制和发布:

- 所有任务的集体剂量(个人报警剂量仪——PAD)(每天剂量和累积剂量)
- 以下任务的集体剂量 (PAD):i) 估算剂量 >10 人·mSv, ii) 估算剂量 <10 人·Sv; 以及 iii) 日常活动、支持活动(无估算剂量)的集体剂量。
- 因摄入氡导致的内照射集体剂量。

瑞典:与承包商的合作(Oskarshamn 核电厂)

在 Oskarshamn 核电厂,当承包商对某项可能涉及相当大个人和/或集体照射的作业进行合同准备时,将会对其预期剂量及其费用进行计算,并包括在合同报价中。为便于承包商开展作业,也为了确保计算的准确性,电厂将对承包商提供所有必需的资料(图片、剂量率、图纸等)。承包商的计算结果将由电厂安排来跟踪该项作业的辐射防护专业人员进

渐进式变化图—估算的/实际接受的 γ 外照射集体剂量(所有作业/任务):
计划大修,2006年9月



行审查,承包商需要对其建议规程怎样才能确保照射保持“合理可行尽量低”进行解释。通过执行该规程,承包商对问题进行充分的理解,并能够基于过去的经验提出解决方案,从而为电厂提供更好的产品而只受到较低的照射。

美国:ALARA 情况通报会、停堆检修指南和与承包商的 1 小时会议

在有些美国核电厂,由辐射防护值班主管以及 ALARA 工作组代表向被分派开展某项特定任务的工作人员简单通报相关情况。这些通报是成文的,包括:

- 工作规程的审核;
- 工作区域条件的审核;
- 必要工具和设备的讨论;
- 放射性情况通报(辐射工作许可中所有特定要求的审核以及关于人员在辐射区域履行其职责的讨论)。

此外,在停堆检修开始时,ALARA 工作组用 1 小时的时间向承包商通报停堆检修目标方面的情况。每个工作人员会

收到一份停堆检修指南,上面提供了主要活动相关责任人的电话号码、停堆检修的目的和目标、日会进度安排、安全方面的建议、质量保证、工业安全、支架、化学控制、工勤杂务、辐射防护等。该指南中还包括主要区域以及主要系统位置的 25 幅地图。

激励工作人员并让其参与的其他激励措施

某些情况下,对良好 ALARA 绩效作出表彰的激励计划可用来促进工作人员努力降低剂量。例如,该计划可以对最好的班组或者对与兄弟电厂或以前大修结果相比成绩优异的班组进行表彰。公司奖励能使管理层对工作人员强化一种意识,即做好某项作业是很重要的。尽管奖励和激励措施可用来鼓励工作人员在使照射“合理可行尽量低”方面提出反馈,但还是应当建立相应的组织机构,允许和鼓励将日常的反馈作为工作计划和总结评价流程的一个环节。

日本、美国:激励计划示例

在日本,东京电力公司(Tokyo Electric Power Company, TEPCO)的某些核电站十多年来,每年都要针对良好的工作管理以及减少辐射剂量与放射性性固体废物的良好实践,举行一两次比赛。这些比赛由核电站工程部经理主持,来自各维修承包商的十多个工作小组参加比赛。参赛者展示良好实践,TEPCO 管理层为表现优秀的展示颁奖。此外,中部电力公司(Chubu EPC)的滨冈核电站(Hamaoka Nuclear Power Station)自 1994 年起就开始推荐降低剂量的良好实践,以提高工作人员积极性。

在美国,一些核动力厂已经实施了几类 ALARA 表彰计

划。其中一些计划是让工作人员可以收集用于购买商品的“ALARA 美金”。其他的奖品还包括公司提供的小物件(帽子、衬衫、铅笔刀)、好的停车位或餐券。奖品与奖金相比的一个优点是,工作人员记住奖品的时间更长,从而对工作人员的态度和电厂 ALARA 文化产生积极影响。

俄罗斯联邦:保健物理工作人员专业竞赛

在俄罗斯,促进保健物理工作人员的教育与培训的一种方式就是专业竞赛。

Rosenergoatom 公司每三年举办一次保健物理工作人员比赛。初赛阶段在核动力厂举行,20~30 名当地的保健物理工作人员在理论和实践两方面进行比赛。然后,从每个核动力厂选出三名最佳选手。他们以个人和团队提名方式参加决赛。获胜者会得到诸如笔记本电脑、数码相机等奖励。此外,多数获胜者在后来职业发展方面获得了成功,也强烈地激励着保健物理工作人员。

4.5 小结

虽然某些类型的工作计划和实施无需工作人员反馈即可开展,但是各级工作人员的参与是有效工作管理计划的最重要的方面之一。让工作人员全身心地投入其所执行的任务,更有可能激励他们在工作中发挥出最大的能力,从而使其在受到更小的剂量的同时能够保证更高的工作质量。为确保工作人员全身心参与,应当有相应的条件,使这种参与具备创造性和连续性。应让工作人员参与工作的所有阶段(计划、进度、准备、实施、跟踪),并保证建立这样一个机制,使每一位工作人员及其技术水平与其所承担的任务相适应。

提高工作人员效能对于贯彻 ALARA 原则也非常重要。这就要求工作人员应接受相应级别的教育和培训,以确保其掌握正确的方法并具备相应的资质。各个级别人员的参与也是必需的,包括高级和中级管理人员、作业负责人、值班主管等。不同级别之间及不同专业之间的良好沟通应作为管理工作的首要任务。最后,工作人员的激励计划将有助于提高和保持工作人员的积极性和参与性,同时,该计划应当为工作人员所节省的时间、剂量和费用以及所提高的工作质量支付报酬。

5 工作计划与进度安排

计划制定阶段是执行工作管理行动和优化辐射防护的重要阶段。停堆检修期间的最优化应予以特别关注。工作计划和进度安排应结合辐射防护原则并通过运行经验反馈和基准校验来确保最有效的方法得以实施。计划阶段还应包含工作人员的准备活动,例如,作业前的情况通报或者模拟操作训练,目的是为提高工作人员的实际操作技能和降低职业照射。

5.1 简介

核动力厂的工作活动应精心策划,确保辐射防护最优化。制订计划不仅必须要明确工作步骤排序,同时要明确各步骤间的相互关系和多专业的特点。彼此密切关联的工作流程、工作区中潜在的相互干扰和损害的识别,以及高剂量工作的识别,对于资源优化利用和任务成功都至关重要。因此本章旨在识别计划与进度安排中的关键要素,这些要素能够使得核动力厂的工作高效完成,而且工作人员的辐射防护工作得到最优化。技术和运行因素将在第6章加以说明。

5.2 停堆检修期间的最优化

停堆检修期间的优化搜索基于两个方面的行动:一是工作选择过程,以排除所有不必要的任务,二是选定所有工作之后制订严格的进度计划。下面对这两方面进行说明。

工作选择

工作选择包含在电厂的停堆检修计划中,将决定停堆检修的持续时间并影响剂量和费用。最短停堆检修时间取决于停堆检修过程关键路径上所花费的时间,例如,一回路卸压、压力容器顶盖打开、堆芯卸料、维修工作的执行、堆芯重新装料、反应堆重新组装和重新升压。关键路径上增加的所有其他任务都将增加停堆检修持续时间。由于可能仍需要增加额外工作量来修理故障缺陷或完成规定的检查,因此,任何关键路径之外的工作任务必须进行评估并证明是必要的。从技术上来说,提高核安全和设备可靠性所需的工作应当予以计划并落实执行,因为这些任务的取消或推迟可能导致计划外停堆和相关的成本、风险和剂量问题。当然,其他改进、新设备安装或对现有系统的变更,也可由发起这些项目的人员建议开展。

由于所有任务都需要评估以保证其必要性,所以一项重要的准则就是对提议任务价值进行合理技术判断,并辨别其是必要的还是可选的能力。在组织团队当中,应当配备一个多学科的专家组(区别于 ALARA 委员会),该专家组定期开会,根据维修大纲的电厂特定准则,来进行此类评估。该专家组应清楚认识到开展不必要的任务只会增加成本和导致不合理的辐射剂量,并对将要开展的工作做出“是”或“否”的决定。

为了降低停堆检修期间的工作负荷,如果需要的话,在运行期间可以考虑进行计划预防性维修(PPM)。当然,开展预防性维修的可能性还取决于各个系统在冗余度和多样性方面的实际设计情况,尤其是那些与安全性相关的系统。此外,考虑哪些系统可开展预防性维修,还取决于所处的辐射条件。

最后,还应当考虑制定一个多年的工作规划来处理电站辐射水平持续改进的问题,例如,通过设计改进的方法、提高工作实践的方法以及其他的方法。该规划应包含一项长期的工作计划,确

定须逐步进行的改进,并以结构化方式反映在每次的停堆检修工作计划中。

瑞典:运行期间计划预防性维修(PPM)的使用(Forsmark 核电厂)

在 Forsmark 核电厂,只有当以下条件 and 限值满足时,才可能开展安全相关系统的计划预防维修:

- 技术规格书特别规定的对系统的计划预防性维修和持续时间。
- 每次维修时,4 列当中仅有一列可能受影响,其余 3 列仍处于运行状态。
- 该工作是遵照操作指南开展的。
- 在计划预防维修过程中如果发现故障部件(由任何非预期原因造成的),将按照技术规格书中所明确的,必须满足特定的维修准则。
- 冗余系统中计划预防维修之外的任何一列如果也发现有故障部件,那么也将按照技术规格书中的规定,必须满足特定的维修准则。
- 反应堆的运行模式在计划预防维修过程中可以改变。
- 计划预防维修的最长总持续时间可以达到每年 60 天。

工作进度安排

明确了所有工作任务及其相应的进度安排之后,在计划阶段就能够预计到潜在的问题,从而采取纠正措施以优化进度安排。在确定总的进度安排时,很重要的一点是要记住:一项任务通常会尽可能占用其在进度安排中所分配到的时间。相比优化的时间表,宽松的时间表有很大可能性会使得完成所有工作和任务花

费更多的时间。因此,通过简单优化时间表,就能节省时间、剂量和费用。另外同样重要的是,要意识到如果停堆检修时间因为某项工作任务而延长,将会由于其他任务进展更慢而导致过量的辐射剂量。若一项非预期的任务会导致停堆检修的显著延期(比如,由于零部件未能按时送达),如果系统能处于安全模式,并且能够基于剂量降低的预期得到安全当局的同意,应采取努力将该工作推迟到下次停堆检修时再开展。

停堆检修时间

基于工作任务选择和最优化进度安排来优化搜索最佳停堆检修时间,已经在大多数电站和所有堆型中得到成功实践。图4显示的是PWRs、BWRs和VVER连续3年的平均停堆检修时间的变化情况(ISOE, 2008)。现在的平均停堆时间大约是50天。

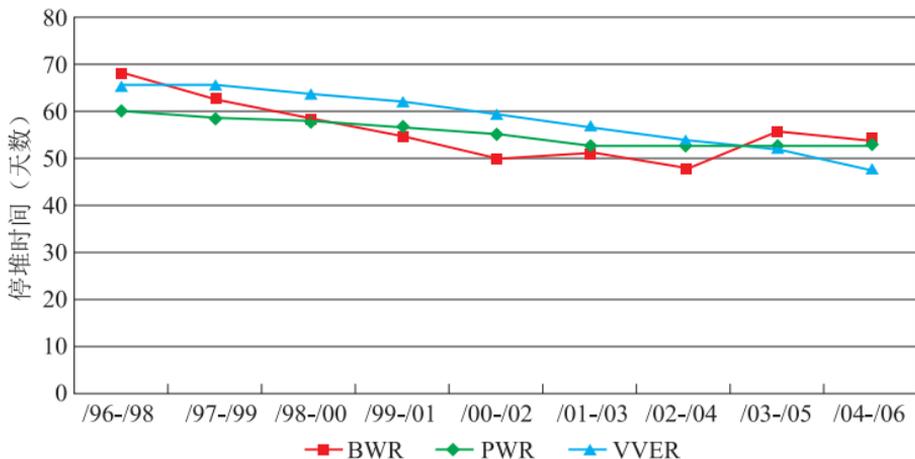


图4 不同堆型的平均停堆时间

一些核动力厂也正在开始实施仅用于换料的短期停堆检修(例如,芬兰 Olkiluoto 核电厂 7 天的停堆检修时间),期间仅开展少量维修工作;此后,在接下来的一年当中再开展大规模停堆检修,期间将开展全面的维修工作。

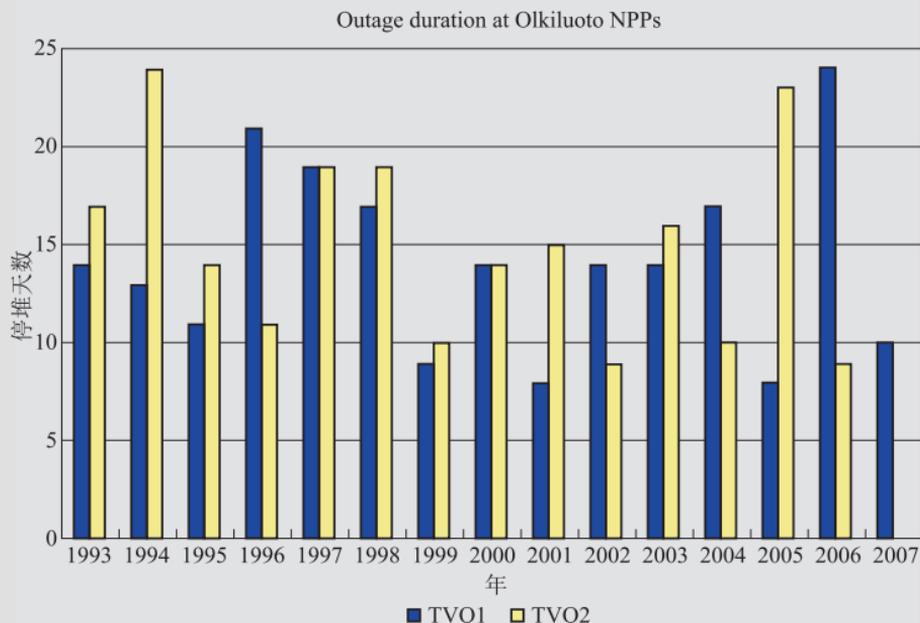
芬兰、法国:停堆检修类型和持续时间

在芬兰,Loviisa 核电厂的计划停堆检修类型包括:

- 短期换料停堆检修:计划持续时间为 18 天(每隔一年);
- 正常换料停堆检修:24 天;
- 检查停堆检修:34 天(每 4 年);
- 扩展检查停堆检修:42 天(每 8 年)。

Olkiluoto 核电厂停堆政策是:

- 短期换料停堆检修:7 天;
- 长期保养停堆检修:14~21 天(正常,长期);
- 年度内不同机组停堆检修有短时的间隔。



在法国,EDF 电站有三类停堆检修:

- 短期换料停堆检修:大约 3~4 周;
- 正常维修停堆检修:大约 6 周;
- 10 年维修停堆检修:大约 14 周。

在短期和正常停堆检修之间进行轮换；对于电功率为 900 MW 的电厂，两次停堆的延迟间隔通常为 12 个月，而对于电功率为 1 300 MW 的电厂则是 18 个月。

5.3 作业计划流程

工作计划

关于换料停堆检修的工作任务，传统理解上有三种类型：i) 计划工作；ii) 没有预先计划并且可能因此导致延期的非计划工作；iii) 紧急工作。

计划工作

有效的工作计划对于辐射防护最优化以及运行和维修费用最小化至关重要。它不仅对于停堆检修计划十分重要，而且对于“带功率”时的工作也同样重要，为的是确保在整个功率循环周期内费用和剂量都是最优化的。整合的工作计划允许在辐射区域的工作作适当的检查，从而提供机会将必要的控制因素考虑到工作计划中。

整合工作计划的一种方法是指派维修计划制订人员来制订下达至工作层面的辐射防护计划，而不是指派辐射防护人员。这种做法将职责交给更贴近于实际工作的一线管理人员手中，并能促进各工种间的沟通交流。当然，作为多专业计划团队的一部分，保持辐射防护人员在该过程中的参与性是十分必要的，例如，提供关于工作地点辐射条件的输入，关于承包商和材料选择的反馈经验，以及对规程进行的 ALARA 评估。该方法目前已应用于世界范围的许多核动力厂。

计划团队的一个重要考虑内容是对教训的总结，并在计划过程中采取纠正行动（参见第 8 章）。计划人员应该利用最可利用

的同类型电站在其机组计划类似工作过程中的关于源项、工作时间和人员配备方面的信息,从而提高计划的有效性。非最优化的信息将可能导致过多的屏蔽和额外的时间等。

作业计划团队的实体工作地点同样是计划过程成功的一个因素。尽管许多沟通交流可以通过电子设备进行,但是将计划人员集中到一个地方更有助于畅通交流渠道,并能够更有效地交换信息。为了加强工作管理的多工种特性,大多数已成功将有效辐射防护考虑纳入计划过程中的电厂同样也将辐射防护人员纳入计划组织当中。

非计划和紧急工作

非计划工作指的是没有作为停堆检修工作范围内的一部分预先识别或计划、并在随后停堆检修期间被发现的电厂设备修理和工作,例如,在机组停堆和压力容器顶盖移除后发现 BWR 干燥器破裂需要进行修理的非计划工作。紧急工作指的是停堆开始后识别的、导致工作范围扩大的新问题或关注点,例如,基于涡流检测的结果,需要对甄选出的蒸汽发生器传热管进行堵管。

对于这两种情况,电厂应该预先确定在停堆检修期间识别出非计划或紧急工作的情况下所采取的策略。这可能包括,例如,决定是否必须立即响应在停堆检修期间识别的工作,或者能否推迟到下一次停堆检修时,或者在进度/预算安排时包括一个应急预案来完成此类必要的工作。

工作进度安排的辐射防护因素

细致的工作进度安排和进度审查对于保持剂量“合理可行尽量低”是非常重要的。剂量贡献明显的维修工作的是在压水堆和沸水堆的换料停堆检修期间以及在坎杜堆的维修停堆检修期间开展的,此时的辐射场强度在大多数地方都明显小于功率运行期间。不过,还有些其他的维修工作可能在降功率来调节控制棒组

期间进行,此时的剂量率比诸如沸水堆蒸汽影响区之类的区域低。

在停堆检修期间的某个特定时段内开展的进度安排工作也很重要。通过将作业按照最优次序排列并在合适的时机开展,就可以零成本地节省剂量。例如,如果时间表并没有要求与放射性系统相关的作业必须在停堆检修初期完成,那么这些作业就应该安排在剂量率降低以后进行。冷却剂净化和天然放射性衰变都有助于剂量率的降低。此外,在系统满水期间,一有可能,就应当安排相关的作业。即使工艺水被污染了,仍可以吸收辐射。当系统充满水时,在管道、阀门或泵表面的剂量率几乎总是要比排空时小很多。通常假设有水存在时剂量率将降低 30% 的量级。这对于靠近管道的工作有重要意义,例如与保温、屏蔽和脚手架等相关的工作。在合适的地方对系统进行冲洗,可以消除热点和去除杂质沉积物,同样有助于降低剂量。

在制订计划的过程中,很重要的一点是要对一个区域内的所有工作及其有多少相关的作业有清楚的理解。为了利用那些将要开展、正在进行和最近完成的其他工作安排,以避免一项作业对其临近的工作班组造成辐射问题,或者由于场所拥挤造成安全性和生产率下降,计划制订者应考虑“基于时间”、“基于资源”和“基于区域”的进度安排方案:

- 基于时间的进度安排是传统的停堆检修方案,在换料停堆检修主进度计划中分配时间块给已计划的工作。时间轴考虑的计划事务包括关键路径工作、二次安全壳的维修需要、短寿命惰性气体的衰变和燃料操作时机窗口。
- 基于资源的进度安排其目的在于利用现场的布置或基础设施来开展多项活动,从而节省剂量和费用,例如,重复利用已污染的密闭房间或先前立起的脚手架开展多项任务。
- 基于区域的进度安排需针对确定的工作扇区评估工作的

类型和集中程度。这可以通过将工作区域划分成反映不同类型工作的网格来完成。该网格划分可以被覆盖重叠,使得进度安排人员、计划制订人员和班组长能够形象地描述出各网格区域中的所有工作。该项工作可以通过计算机系统或者工程制图来实现。

工作计划工具

先进的图形工具为工作计划人员、辐射防护作业前计划和工作人员作业前会议提供了很好的可视化参考。许多电厂已意识到需要记录和获取各种电厂区域和部件的图像资料,通常情况下,这些资料由于电站运行和/或者高辐射水平而无法获取。每当进行工作计划时,中央图像数据库可为作业计划提供一致的信息,使得目视检查的工作量最小化,并降低多余的和不一致的、由不同小组各自记录的选定部件图片和视频的工作量。由于许多工程师通常是用数码相机拍摄电厂物项,因此这些文件必须恰当命名并保存在中央信息管理系统中,以避免在下一轮工作计划时还需重新拍摄。

下面列出的先进图像工具正在世界各地得到广泛应用,这些工具不仅可以更好地观察和评估工作区域,还可以更好地考虑可能影响作业执行的潜在环境约束,这些工具包括:

- 计算机多媒体
- 录像磁盘图像存储和检索系统
- 视频和数字摄影
- 图像传送技术
- 摄影测量技术

—伽马照相机辐射场摄影技术

—CZT(Cd,Zn,Te)探测器(多谱伽马分析)

使用或收集这些技术和信息在新电厂服役期间尤其重要。

在安装有远程监控系统的电厂,这些系统记录的视频可以用

于作业计划阶段。此外,许多电厂还在设计阶段运用了三维计算机辅助设计(CAD)模型。老一些的电厂也采用了激光扫描和三维计算机技术来描述和验证实际电厂环境,从而最大限度缩短工作时间。这些工具应该在工作计划过程中应用到任何可用的地方。

法国:三维建模软件

EDF 已经研发出两大类可用于工作计划制订的三维建模软件:

- PANTHERE-RP:对区域的静态模拟,可给出主要部件剂量率。该软件用于估计各个部件对周围剂量率的贡献大小,应用于屏蔽优化以及新装置和改进的概念设想。
- ADRM:在可以对任务进行时间和空间模拟的地方进行动态模拟。该软件可以模拟如何移除和更换大型部件(例如,热交换器)。区域模型基于现场激光扫描的真实数据。

德国:三维图像系统(Phillipsburg 核电厂)

由于满功率运行时的剂量率很高,许多控制区域内的区域都无法进入,或只能有限进入。在这些区域内开展技术评估十分困难。一种尽可能避免进入高剂量区域的方法是采用在 KKP1 和 KKP2 里的特定的“房间信息系统”。该计算机程序由三维房间模型组成,这些房间位于机组内部,正常情况下为不可达区域。因此,在许多情况下就能基于“虚拟”开展技术评估,而无需受到高剂量率的辐射照射。为了运行该系统,需要在之前的停堆检修期间对这些区域进行三维激光扫描。在这些激光扫描文件里,可以测量出计划选点的距离,精度为每 10 m 误差 2~3 cm。

西班牙:地图数据库(Almaraz 核电厂)

在 Almaraz 核电厂,环境和辐射防护部有一个涵盖两个机组放射性特征的综合地图数据库:计算机内存储了 300 幅各区域的房间地图以及 3~10 个测量点(设备周围和设备接触表面)的、作为机组在停堆前和停堆期间不同状态函数的剂量率记录数据。

英国:保健物理信息表(Sizewell B 核电厂)

Sizewell B 核电厂制作了“保健物理信息表”,该信息表包含了一幅需考虑的阀门、焊接点或部件的照片,一幅指示电厂该物项位置的地图,以及一段关于在各种电厂状态下的局部放射性条件和关于使剂量最小化的最优工作窗口建议的简要说明。该信息表最初打算用于帮助工作团队找到作业地点,现在则被工程师们在做作业时广泛使用。

工作团队的规模和管理

工作范围和工作场所因素将影响到进行某项指定作业所需的团队人员的规模。一个工作团队的最佳规模是用最少的人员即可按照工作计划和进度安排完成规定任务。通常可以说,人员数越少,集体剂量也就越小。例如,如果人员数翻倍,则工作时间会缩短,但并不会相应减半。增加更多工作人员将会增加总工数,进而增加集体剂量和费用。因此,通常而言,考虑到不超过规定的剂量约束和诸如噪声、热量等工作场所因素的影响,分配给某项作业的工作人员数量不应超过必要的最少人数。

关于集体剂量如何随着工人数量增加而增加的另外一个例子是工作人员的更换。一项作业中受到的剂量是三个阶段的总和:1)到达工作位置、定位和按次序摆放工具并开始工作这个阶段所受到的剂量;2)作业时受到的剂量;3)完成作业、确保工作现场安全、移除防护设备并离开这一阶段受到的剂量。第二阶段受

到的剂量大小相对恒定,并且与交班的工作人员数无关。但是第一和第三阶段当中,每次工人或工作班组变化时都将增加剂量值。因此只有当需要控制个人剂量或管理其他工作场所因素时,才应采用工人更换的方式。

承包商的选择

由于大多数停堆检修工作通常是由承包商进行的,所以建立一个流程以便在需要时根据所要开展的工作确定和选择合适的承包商是非常重要的。选择承包商应基于一些准则,包括承包商提出的工作当中辐射防护最优化方案以及其过去的业绩。由于电厂和承包商之间的互动是优化作业设计的最有效的途径之一,所以很重要的一点是在作业设计阶段就让承包商参与进来,这样就能在工作开展前留有足够的时间(参见第4章)。选择承包商时应考虑曾与哪家承包商合作过,以及完成水平如何。

法国:选择承包商的经验

在新维修操作的计划阶段,EDF选择承包商基于几项准则,包括承包商展示他们已经对任务的辐射防护的最优化方案(时间、剂量和费用)进行了研究。承包商选择好以后,务必要召开几次承包商和电厂之间的信息交流会来继续开展任务设计工作。承包商需编制的文件包括放射性风险分析(外照射和内照射,污染物迁移等)和辐射防护规程。

5.4 工作流程控制体系

工作流程控制对于精心计划的停堆检修能否成功至关重要。计算机化的工作流程控制系统通过提供作业相关的信息来辅助计划过程,这些信息包括不同部门的授权审批过程,以及进度安

排和工作场所要求等方面的内容。这些系统同样可以作为工作班组的工具来操作使用,为其提供指导信息,并向所有相关的群体提供运行状态方面的信息(第7章)。辐射防护数据库里的信息可为其提供支持,这些信息涵盖了剂量率和影响放射性风险的其他参数。

这样的系统在计划和进度安排阶段以及处理非预期作业时具有很大的优势。大多数电站的经验是,即使是在非预期高优先级作业的情况下,也必须要有临时的计划和进度安排策略,以确保获得足够的工作成效和避免返工。基于计算机的系统使用同样的信息库(部件、场所、工作条件),并且纳入了过去类似操作经验等信息,有助于实现快速计划和进度安排,也可包括辐射工作的许可。

工作计划中的辐射工作许可证

辐射工作许可证(RWP)通常是一份书面的并获得批准的文件,该文件制定了安全执行那些被认为是“辐射工作”的某项特定活动或作业所有必需的辐射防护措施,并处理与这些活动相关的放射性废物方面的问题。这些由辐射防护工作人员在开始作业前颁发给工作人员的许可证,通常包含了如下信息:作业的日期和时间、人员数量、作业描述、预期剂量、剂量率、表面和空气污染水平、所需防护服、生物屏蔽、对作业的辐射防护监测类型等等。

使用辐射工作许可证有诸多好处。首先,需要制作许可证的任务要求对必要的辐射防护进行计划和预测。此外,辐射防护的工作人员可以知晓停堆检修期间控制区域内的所有计划作业,并能够对工作进程进行监测。在现场,许可证中所包含的信息有助于团队领导和工作人员注意到工作场所的放射性情况。辐射工作许可证还能够用于检查(并因此限制)进入,特别是在工作人员进入该区域时系统能够自动读取许可证的有效日期。最后,许可

证还可用作数据库来收集与特定作业相关的剂量信息(参见 7.3 节)。

法国:PREVAIR 软件

在法国,EDF 开发了 PREVAIR 软件,用于准确预测某项作业的预期剂量。在准备阶段末期,该软件可以打印辐射工作许可证(RTD),包含以下信息:

- 作业的预期集体剂量;
- 每天的作业预期平均个人剂量;
- 工作场所的预期剂量率;
- 要执行的辐射防护行动;
- 当实际剂量率或实际集体剂量与预期值显著不同时将要执行的规定指令。

每张辐射工作许可证相应的条码用于控制区域入口的检查(如果系统未能识别该条码,则拒绝进入),在工作人员离开控制区域时,修改其所使用剂量仪的报警设置,并在停堆检修剂量数据库中记录该项作业的剂量值。

罗马尼亚:辐射工作许可证体系(Cernavoda 核电厂)

在 Cernavoda 核电厂,作业前后的辐射工作许可证(RWP)分析涉及电厂的所有工作群体乃至 ALARA 委员会成员。辐射控制服务人员对照 RWP 中提到的辐射防护要求的遵守情况进行验证。超过 10 人·mSv 预期集体剂量的 RWPs 将由工作组的 ALARA 协调人员进行审查,从而确定减少照射的备选方案。需要时,这种情况将提交给 ALARA 技术委员会进行审查(针对超过 20 人·mSv 预期集体剂量的活动)。在工作完成后,一份辐射工作许可证报告将发送给工作组的 ALARA 工作人员。如果需要的话,ALARA 工作人员将会对预期剂量和实测剂量的差异进行论证。

5.5 高剂量作业的作业计划

识别和追踪高剂量作业

高剂量作业是那些应优先纳入辐射防护控制系统的作业。同样的,有必要将对它的识别作为工作计划的一部分,并在工作过程中追踪,以确保工作人员个人的防护最优化且不超过职业剂量限值,并制定工作期间意外事件情况下的应急预案。作为例子,表 2 列出了轻水堆的典型高剂量作业:

表 2 轻水反应堆典型高剂量作业

前 10 项高剂量作业	
控制棒驱动机构检修* 在役检查 主蒸汽隔离阀检修(MSIV) 稳压器阀门检修 反应堆水净化泵检修(CUW) 再循环泵的维修和更换	校准和维修: 堆内辐射监测仪(IRM) 横向传动堆内探头(TIP) 余热排出系统阀门的维修(RHR) 安全释放阀的维修*(SRV)
* 一些电厂由承包商在厂外开展此项工作	
其他高剂量任务	
堆腔去污 化容控制系统维修 保温层拆除和更换 仪表校准和维修 局部泄漏率测试 例行运行监督和阀门管线带电检查 电厂改进项 放射性废物系统维修 放射性废物处理、贮存和装运 反应堆冷却泵维修 反应堆上封头维修 换料	校准和维修: 功率量程测量仪表(PRM) 启动量程测量仪表(SRM) 反应堆水净化热交换器维修 脚手架的安装和拆除 减震器检修 蒸汽发生器维修 蒸汽发生器更换 环管检修 循环系统管道的堆焊工作

利用核工业多年来针对关键作业的共有经验的一个有效途径是使用 ISOE 职业照射数据库和交流平台,可以根据世界各地其他电厂中观测到的结果来衡量某项作业的集体剂量。附录 2 中给出了一个能从 ISOE 网络的网站上找到的辐射防护信息报告的例子。

高剂量作业的 ALARA 准备工作

尽管对所有的作业都必须进行剂量降低的研究,但对于高剂量作业,针对集体和个人剂量进行详细的、系统性的 ALARA 分析特别重要。这种分析应当包括对所有可能降低照射的行动进行系统的评价。通常,作业的计划者采用 ALARA 检查清单来识别可能的防护行动和/或降低剂量的备选方案(附录 3)。详细的检查清单中可以包含以下问题:

- 进度安排的时间是否足够且最优化?
- 需要什么支持服务以及何时需要(脚手架、屏蔽、隔热工作等)?
- 人力是否足够且最优化?
- 能够预测的剂量情况(基于内外照射相关经验)?
- 是否有其他类似部件,能够替代起初计划的“热点”部件进行检查?
- 那些需要保养的部件是否能够移到周围剂量率水平更低的地方进行修理和保养?
- 应当使用何种个人防护设备? 以前用的是什么,有什么好处?
- 可以使用什么降低剂量的技术(例如,系统冲洗)? 之前用过什么技术? 效果如何?
- 上次是哪家承包商干的? 如果他们上次干得好的话,尽量让同一家承包商干甚至相同的工作人员干。他们清楚要做什么以及怎样做。

加拿大:实施辐射防护监督制度(Pickering B 核电站)

在 Pickering B 核电站,在高放射性的危险性工作期间,作为高危险规程的一部分,制定电站规程的主管部门要求对每项高危作业必须指派辐射防护监督员。辐射防护监督员是一个经验丰富、能够胜任的辐射防护协调员或者电站保健物理学家。辐射防护监督员并不直接主动参与高危险工作,而是在任务进展过程中监督其进程。辐射防护监督员的任务是确保严格遵照电站规程和高危险工作计划,同时作为一个中立观察员,一旦预见到程序上的或操作上的问题应将该信息提供给工作人员。

法国:高剂量作业的识别;保温层作业工作人员

在法国,在所有作业开展前都应进行详尽且系统的风险分析。该分析必须对外照射(潜在中子照射,四肢剂量等)、内照射(潜在的 α 污染等)和物质污染的风险进行评价。该分析对于识别高剂量作业和其他风险十分关键。

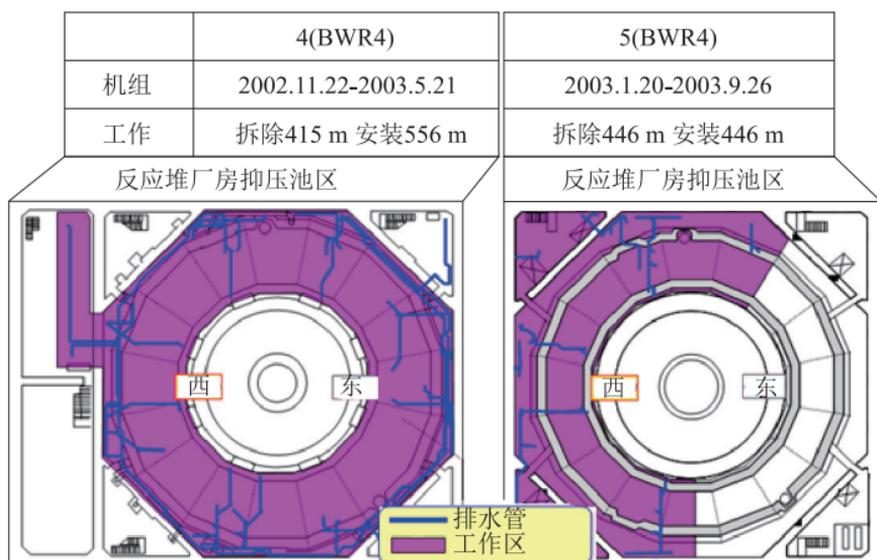
举一个具体的例子,在 EDF 的所有工人中,保温层作业工作人员受到的平均个人辐射剂量最高。核运行部门的 ALARA 项目已针对该问题开展了多年的工作,并得到了以下结果:在 1997 年,为了使现场这些特殊工种的辐射照射最小化,提出了一套关于“良好工作实践”的方案。该套方案包含了用于使剂量最小化的各项措施(保温层类型、各个部件的保护网、工作时间等)。实施该方法后,平均个人剂量从 1998 年的 $6.45 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ 降至 2005 年的 $3.84 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$,即降低了 40%。为了实现更大的改进,这种纯粹基于设备的方法现在还必须通过在作业中进行改进、继续采取更深入的措施。

日本:减少照射(福岛第一核电厂)

福岛第一核电厂(Fukushima Daiichi)4号和5号机组的排水管道更换作业是在高剂量率水平下开展的。为了降低剂量,采取了以下照射降低措施:

- 管道冲洗;
- 临时屏蔽的安装;
- 排放水的处理(4号机组);
- 远程剂量监测仪的应用。

关于远程剂量率监测,除了配备常规的电子个人剂量计外,工人们还配备了无线剂量计 APDs(个人剂量报警仪),尤其是在高剂量率工作期间。此外,还采取了在常规服外、防护服内佩戴剂量计的措施。



设备和地面排水管道拆除工作的范围

5.6 基准分析

在任务计划过程中充分利用可用数据和操作经验可以优化工作人员的放射性防护,并提高总的工作效能。可以利用的信息源有很多种类型,例如作业后报告、停堆检修总结、缺陷/照射降低项跟踪表等。辐射作业计划者可以用到的其他有价值的资源包括有作业历史文件、图片库、信息数据库和其他开展过类似工作的电厂(参见第8章)。

计划制定阶段的基准分析工作能够识别和执行好的实践。既利用历史信息、也利用其他电厂已有经验的基准分析,是有效计划和良好效能的关键环节。基准分析不但可以进行数值数据的交流,而且它还与网络紧密连接,在网络上各电厂间相互联系,还可以进行工作实践、设备和技术方面的交流。整个业界的经验共享是使停堆检修时间最短的一个重要因素,因为关键任务通常是由相同的承包商完成的。如果他们在所有电厂都能采用类似的工作实践,而不是在每个电厂都得学习新的工作方法,那么作业将能更容易、更快地完成。

利用区域或全球用户网络(如行业支持的网络、ALARA 用户组和全球 ISOE 计划)与其他电厂进行信息交流是分享 ALARA 经验和良好工作实践的最好方法之一。在整个核工业界内的这种交流已得到广泛认同和良好支持,尤其是借助于诸如 ISOE 的计划。通过参加业主群的会议,可以开展剂量信息、经验教训和特定电厂管理问题等方面的交流。电厂也可以派工作人员访问其他电厂,并以公认的行业领先者为标杆来对他们的流程进行评估,或者从这些电厂遇到的问题中学习经验教训。收集有用信息有一种方便省钱的方法,就是给其他核动力厂打电话或发送电子邮件。

规程、培训文档、同事可以为辐射防护计划提供详尽的电厂特定信息。人有时是最经常被忽视或未被利用的信息源之一。要找到特定信息合适的联系人,通常要花些时间的,但某个员工在单位的工作时间越久,就越容易找到这样的联系人。

ISOE:使用 ISOE 开展国际间基准分析

ISOE 计划管理着世界上最大的核动力厂工作人员职业辐照数据的数据库,它能根据作业类型和同类型电厂提供各种类型的剂量趋势进行分析。这包括单个机组的年度职业辐照剂量(正常运行,换料/维修停堆检修,强迫停堆检修),每个机组或厂址的个人年度剂量分布,作业特定照射量,电厂配置信息(启动/停堆规程,水化学,ALARA 计划等),以及特殊任务、作业、事件等的特定信息。从降低辐照的角度而言,这些信息都是令人感兴趣的。

ISOE 网络的网站(www.isoe-network.net)提供了 ISOE 资源的链接热点,包括 ISOE 数据库、ISOE 报告、用户在线信息交流论坛、世界范围内 ISOE 成员的联系信息等。ISOE 同样也在世界各地召开 ALARA 研讨会,便于辐射防护专家的直接沟通和经验交流。

日本:基准分析的访问

2005 年至 2007 年期间,来自日本电厂和其他与辐射防护相关组织的代表对美国 and 欧洲进行了基准分析的访问。他们访问了美国核管会和几个美国核动力厂(Fermi, Limerick, Susquehanna, Dresden 和 D. C. Cook),以及芬兰的 STUK 和法国的 ASN、CEPN、EDF。该访问促进了信息的交流,包括新技术(例如远程监测系统)方面的信息、最高管理者责任担当的重要性、维修和辐射防护人员合作的重要性等等,也让日本核动力厂在致力于降低辐照剂量时借鉴这

些信息。

俄罗斯,英国:在基准分析中使用 ISOE

在俄罗斯,俄联邦核动力厂运行研究院(莫斯科)于 2005 年 12 月组织了一个特别的专题研讨会,旨在为 VVER 机组的 ISOE1 数据提供更好的比较和分析。会议编制并出版了名为《运行的 VVER 类型反应堆的 ISOE1 数据标准化的基本原则》的技术手册。

在英国,辐射防护规定要求电厂在任务计划阶段使用剂量约束。该约束应当设定个人剂量水平,有时应设定反映“良好实践”的集体剂量水平。如果工作方案显示将受到高于约束的剂量,该电厂就必须重新评审该方案,以确信为保证剂量“合理可行尽量低”,已采用了所有合理可行的措施。

Sizewell B 核动力厂在确定第一次压力容器上封头更换作业的剂量约束值时,工作人员运用了 ISOE 信息记录表和 ISOE1 数据库来对以前开展此任务的电厂效能进行排序,然后将剂量约束值设定为该排序的前 10%。前 10% 的电厂也同时确定,从而可以直接联系以讨论该作业的各个方面。

ISOE 数据库不仅是为了辐射防护工作人员使用。它同时也包含了与停堆检修管理直接相关的信息,例如某项作业的人员数和开展各项任务所需的人小时数。

美国:历史的 ALARA 数据库

在 ISOE-NATC 里有一个历史的 ALARA 经验和良好实践数据库(1962—1986:根据美国核管会协议,由布鲁克海文国家实验室编纂,于 1995 年移交给海军航空试验中心),是根据期刊和会议文章中获取的信息建立起来的,并且按照关键词进行了分类。

5.7 人员准备

选择合适的工作人员是一项重要的计划任务。拥有一批积极性高、技能熟练、对完成预期要开展的或与之类似的作业有着经验的工作人员。一个积极的、受过训练的且有经验的核动力厂工作人员与一个不常在控制区域条件下工作过的专家相比,能够在更短时间、以更高质量完成相同的作业。

培养一支有经验的、合格的工作人员团队,需要开展大量的培训。这项工作包含两个部分。所有工作人员必须接受教育和训练,从而在他们工作过程中采用 ALARA 方法(参见第 4 章)。此外,作为工作计划的一部分,工作团队应针对将要开展的任务接受特定的作业前培训,培训采用的是实际的(或类似的)工具和设备以及真实的辐射防护服,以提高作业效能。一项降低高剂量作业照射水平的有效方法是让工人在若干次停堆检修时多次进入放射性控制区域,从而使工人熟悉工作情况。

工作人员了解停堆检修的目标以及其作业的预期剂量是非常重要的。工作进行前,由任务经理和/或辐射防护人员组织召开的情况通报会有助于提醒工作人员关于此次作业的剂量目标,以及作业的主要特征。该通报会也是一个传达质量重要性、辐射防护实际上是一个“质量问题”以及避免返工的必要性等信息的时机。

美国:人员准备(Cook 核电厂)

在美国电力公司的 Cook 核动力厂,辐射防护技术人员在连续几次停堆检修中都被指派了特定的任务和区域,从而使他们熟悉区域和工作。这对于高剂量区域是特别有效的,例如安全壳上部和下部,以及辅助厂房的特别区域。将辐射

防护技术人员派往供应商单位(西屋公司)与工作班组一起接受特别高剂量作业的培训(例如反应堆冷却剂泵修理),也已证明对于与工作班组建立跨学科沟通纽带是非常有效的。

模拟训练

人员准备的一个重要途径是采用模拟设备针对某些类型的工作进行训练,例如超声波扫描仪或临时屏蔽的安装、控制棒驱动机构的拆除和更换,阀门拆卸/重新组装或者其他的高剂量作业。在模拟设备上训练可以使工人能够在清洁环境中重复进行预期任务。这就使得工人在进入辐射区域前能够熟悉维修或检查流程、专用工具或支持装置、或艰难的工作条件,从而提高在辐射区域工作的效率。通过让一些工人对同一作业进行训练,可将最精细的任务交给那些训练中表现最好的人员。不管在怎样的情况下,训练有素的工人都能更高效地执行实际任务,而且完成的时间更短,接受的剂量也更低。

由于不正确的模拟训练会适得其反,因此模拟训练计划的正确执行包含三个重要方面:

- 如果可能的话,模拟仿真的设备应该是全尺寸的,并且应放置在与现场位置相类似的环境中;
- 实体的限制物和条件(脚手架、铅屏蔽、保温层等)应按照实际工作的情形进行安装;
- 全套的人员防护装备、呼吸防护装置、通信工具和可接近限制应也应当进行模拟。

在欧洲,许多压水堆核动力厂都设有现场的蒸汽发生器通道封头模拟设备对电厂和承包商工作人员进行培训。甚至一些专业核电服务公司也拥有自己的模拟机对其员工进行培训。

比利时,法国,匈牙利,日本,韩国:模拟机训练的使用

比利时的 Doel 核电站,每个堆群(fleet)都有一套蒸汽发生器模拟机,同时还有一台反应堆压力容器上封头模拟机,两台裂口清理模拟机,三台热电偶作业模拟机和三台棒束控制组件耦合/失耦的模拟机。

在法国,由 EDF 和 AREVA 运营的 CETIC 培训中心可作为一个有效使用模拟机培训的很好范例。这个占地 4 000 平方米的场所放置了所有压水堆的主要部件(压力容器、容器上封头、蒸汽发生器、稳压器、堆冷却泵、换料机、燃料组件、堆腔等)的全尺寸模拟机,主要用于工人培训和新设备测



EDF CETIC 装料培训

试。举一个具体的例子,用于开展堵管工作的“蒸汽发生器 jumper”的培训能将操作人员待在通道封头位置的时间由 45 秒降至 20 秒。对于这些在高剂量率环境中的作业,研究表明充分的模拟机培训能将在高剂量率环境中工作的时间最高降低 40%。

在匈牙利,Paks 核电厂拥有一个装备了 VVER 机组大部分主要部件的培训中心。大约有 15 名工人在该培训中心全时工作。其独到之处在于该中心的部件与控制区域内的部件完全相同,因为这些部件最初都准备用于电厂(最终都从未运行过)。特别的是,这里有一台蒸汽发生器、一台反应堆压力容器、一台压力容器上封头的一半、一台主泵、堆内构件组件、一台隔离阀、一座非破坏性测试实验室、电气设备等等。这些部件用于工作人员(来自电厂、承包商)刚到电厂时的实训,以及每年一次的再培训课程。每次最多能同时对 10 个人开展培训(每个部件 5~6 人)。另外,这些模拟机同样也可用于维修任务的准备工作,以及从 ALARA 角度对新技术、新部件和新装置进行验证。

在日本,关西电力公司运行着有一套模拟设施。该模拟设施同样用于在实际工作场所使用前对新开发的工具或装置的测试,这样就可以在实际停堆检修前节省时间并优化使用和功能特性。许多电厂都拥有自己的模拟机或训练设施,通过有效使用这些设备来培养相应技能。

在韩国,已开展两到三次模拟培训,使工人熟悉高辐射工作,包括进入蒸汽发生器和稳压器。这些培训有助于可靠、快速地完成工作,进而降低集体剂量。针对培训已准备了各式各样的模拟工具,包括用于安装管嘴挡板的蒸汽发生器腔室的模型、一个用于更换的堆内仪表密封平台、用于包裹

的反应堆冷却剂系统边界阀门以及用于移除加热器的稳压器内部构件。

加拿大:SFCR 训练模拟(Pickering B 核电站)

单根燃料通道更换(SFCR)是一个复杂的工程,需要涉及许多专业人员和工具。这是一个高剂量的作业,原因是工作的主体部分需要在剂量率通常较高的反应堆正面开展。连同屏蔽一起,使人员位于反应堆正面之前的时间最短是保持剂量“合理可行的尽可能低”的一个有效技术手段。为了实现该目标,需要在为该工作专门设计的模拟机上开展强化培训和演练。这不仅能降低人员失误的可能性,同时也有助于快速且高效地执行工作,从而缩短在反应堆面上停留的时间。

日本:IKata 1 号堆芯内部构件更换的模拟机训练

在四国电力有限公司的 IKata 1 号堆,为了进行堆内构件(CI)更换工作,开展了如下模拟训练:

- 现有的上部堆内构件的支承管螺栓的拆除;
- 在出口喷嘴和新堆内构件的径向支撑位置开展缝隙测量;

CI 更换相关活动	培训描述	培训地点	执行日期	培训人数
1. T/C 支承管分离	培训切割 T/C 导管,移除 T/C 支承管螺栓,在 T/C 支承管中插入塞子防止逆流反转。	IKata 核电厂	2004 年 8 月 23 日— 9 月 2 日	28
2. 现有 CI 部件的移除	培训分离 T/C 支承管,取出时对 I/S 进行标记并将其放回原位。	三菱重工	2004 年 5 月 10 日— 5 月 21 日	10

续表

CI 更换相关活动	培训描述	培训地点	执行日期	培训人数
3. 新 CI 的组装和安装	培训向下吊装新的 CI 到压力容器中进行对齐, 测量出口喷嘴和裂缝间隙, 以及冷缩配合径向支承键。	三菱重工	2004 年 6 月 12 日— 6 月 23 日	28

T/C: 热电偶; I/S: 辐照样品

5.8 小结

计划停堆或在役检查活动的工作选择和计划制订阶段, 是实施工作管理节约成本的最有效的阶段之一。通过合理选择工作(包括那些不会开展的任务), 时间、人力和剂量都可以节省。通过在规程固化和设备采购之前有效的工作计划, 就能较为容易和低成本地进行变更。

通过将所有合适的工作人员(计划人员、工程师、进度安排人员等)集中安排到一个地方, 可以优化作业计划者的办公地点, 从而培养和促进跨学科的沟通交流。此外, 合理的作业进度安排以协调服务设施、脚手架、安装的屏蔽层、管道和水箱的水屏蔽等的使用, 并协调计划目的(以及培训和工作人员定位)的比例模型的使用, 都有助于资源的高效利用。

有效选择和计划工作的关键问题包括: 在基于开展工作的必要性决策时使用现实的假设; 只选择那些对安全和电厂高效运行“有必要”的作业; 执行一套严格但不仓促的流程来降低返工的风险。就作业计划而言, 有效地考虑从以前作业中所获取的教训以及从核工业其他地方开展的相似作业中所获取的教训是十分必

要的。通过数据库和通信网络(例如 ISOE、INPO、WANO 等)的经验分享能够提供非常有用的经验,并有助于避免重复性劳动。通过高度关注那些最高剂量的任务,通过有效利用可用的经验,工作选择和计划活动就能得到最佳的聚焦和导向。

6 工作准备

工作的成功与否很大程度上取决于准备工作的质量。为实现充分准备,理解源项以便选择合适的剂量率降低技术(比如去污和屏蔽)是十分重要的。工具和设备的使用,例如采用机器人避免照射,以及工作环境的改进也非常有效。这些技术在持续发展改进中,因而在任何时候,工作人员均应选择那些可用的最佳技术。

6.1 简介

本报告提到的“工作准备”涵盖了在工作开始之前和进行过程中所考虑或进行的所有实践活动,这些实践活动的目的是准备工作场所以及确定工作人员。大量准备工作必须先于停堆完成,要实现工作条件和辐射防护最优化,工作准备和支持及工作环境的改善非常关键。因此,工作准备应恰当反映即将进行的工作任务的多面性的特点。

为实现辐射防护最优化的目的,源项的影响因素、工作的持续时间以及受照的工作人员数量均应作为工作准备的一部分加以说明。本章重点在于工作准备的技术和操作方面,尤其是源项。行政管理方面的内容在第5章予以讨论。

6.2 源项特性

在核动力厂中,职业照射主要来源于核反应堆结构材料产生

的活化腐蚀产物。针对活化腐蚀产物源项,为发展适当地降低辐射照射的措施,理解源项自身特性十分重要。源项特性包括核素种类及其能谱,放射性活度水平及其空间分布,剂量率分布等。评价这些特性所需的设备应当进行校准并处于“就绪”状态,以保证在需要时这些设备的可用性。对工作优化来说,基于测量或预测的剂量率分布模拟也是非常有用的。

法国:源项特性

EDF 使用 CZT(Cd,Zn,Te) 谱仪测量来自点源、面源或体源的 γ 谱。每次停堆大修在特定回路上进行系统的测量,以便:

- 确定每种核素对周围环境剂量率的贡献;
- 获取回路污染诊断信息;
- 确保从一个循环周期到另外一个循环周期回路污染的持续有效跟踪监测;
- 及时识别可能造成整个回路污染的潜在“污染”问题;
- 辐射防护管理者参与,增强其对于污染问题管理的认识。

西班牙:在剂量优化方面将 γ 扫描技术和三维剂量模拟技术结合使用

对于计划在现场开展工作的剂量优化,Almaraz 核电厂采用了将 γ 扫描技术和三维剂量模拟技术相结合的评价技术,该技术由欧共体合作研究开发。使用 VISIPLAN 程序计算得到工作区域基于两种不同方法的剂量率分布图,其差异在 20%~30% 之间,考虑到 VISIPLAN 使用的点核计算方法以及扫描解析的 γ 扫描校准方法的精度,这个结果还是相当好的。

6.3 源项降低技术

工作人员受到照射的辐射源项可能存在于系统和管道内部、表面和空气中。以下章节讨论了一些减少或去除上述源项,从而降低工作人员受照剂量率水平的技术。对于活化腐蚀产物的去除,使用各种技术手段的目标是采用物理或化学的方法,在尽量不损伤保护膜的前提下去除附着表层(transient layer)的活化腐蚀产物(图 5),以此降低厂内的辐射场剂量。

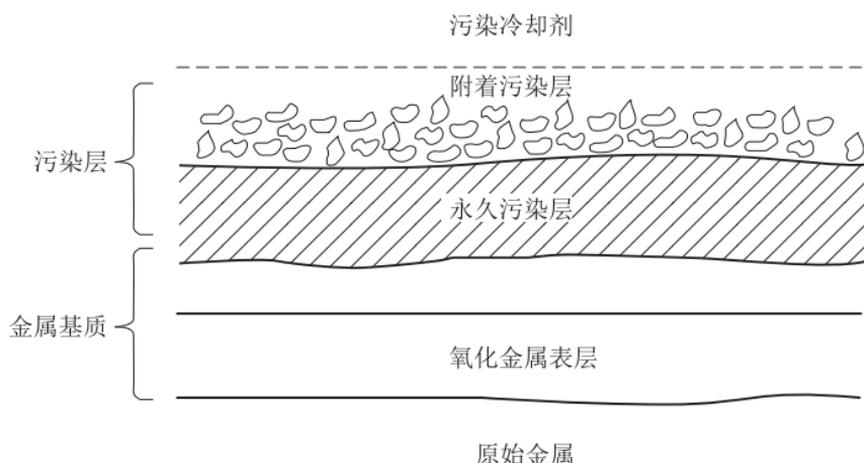


图 5 反应堆冷却剂系统腐蚀产物沉积(CRUD)层示意图

化学去污技术

系统内部的化学去污是去除放射性物质和活化母体金属以降低辐射剂量的一种有效方法。化学去污采用去污剂溶解的方式,去除附着在反应堆冷却剂系统设备及管道表面或被设备及管道吸收的放射性物质,如 Co-60。化学去污工艺在核动力厂的商业应用起始于 20 世纪 80 年代早期。

化学去污工艺最通用和有效的方法是使用氧化还原反应去除各种部件内部(比如管道、泵、阀门和水箱等)积存的放射性物

质。虽然这种方法更广泛的应用是在沸水堆的反应堆再循环系统、压水堆的冷却剂净化管道系统或者主泵的运行传动装置,但也应用于压水堆的蒸汽发生器封头。

现在,很多核动力厂在换料大修期间例行开展化学去污。一些电厂发现在进行去污之前有必要进行大规模的维护操作。一般地,ALARA(合理可行尽量低)代价-利益分析是决定是否进行该过程的基础。影响分析的因素包括特定核动力厂的剂量率水平、预期的剂量降低值、集体剂量(人·Sv)值以及组织的技术接收准则。

日本:全系统化学去污

东京电力公司(TEPCO)的 Fukushima Daiichi 核电厂 3 号机组(沸水堆,784 MW)在 1997 年 5 月到 1998 年 7 月进行的第 16 次定期检查中对焊接类型的反应堆堆芯围板和其他反应堆内部构件进行了更换。在这次更换中,进行了全系统化学去污(FSD)工作。

通过执行 FSD,得到反应堆压力容器(RPV)底部平均去污因子为 43,反应堆再循环系统(RRS)表面平均去污因子为 46。去除的放射性活度和金属质量分别约为 10 TBq 和 72 kg,而 FSD 产生的废物只是 5.4 m³的离子交换树脂。经过机械清洗,在 RPV 屏蔽作用下,RPV 底部的剂量率水平为:水下 0.03 mSv/h,无水 0.2 mSv/h。由于 RPV 剂量率降低,职业照射也降低到 11.5 人·Sv(目标值是 12.6 人·Sv)。

在 2000 年 12 月到 2001 年 9 月进行的第 22 次定期检查中,Fukushima Daiichi 核电厂 1 号机组(沸水堆,460 MW)进行了类似的替换工作。在替换工作期间,集体剂量进一步降低到 4.6 人·Sv。

日本:T-OZON 化学去污流程

化学去污的原理是基于金属材料上的金属氧化物的溶解。溶解的金属,比如 Fe 和 Cr,可以很容易使用离子交换器去除。优异的去污技术可以实现一个高的去污因子,最少的二次废物,并且对设备材料完整性没有负面影响。基于这些特性,日本发展出 T-OZON 去污流程。T-OZON 去污流程的基本原理如下:

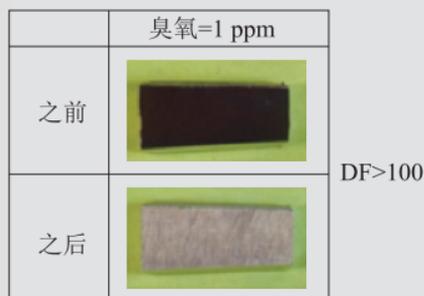
- 使用 Oxalic acid(草酸)将铁酸盐转变为可溶解的铁;
- 使用 Ozone(臭氧)将亚铬酸盐氧化成可溶解的铬;
- 经过化学反应,所有反应物均可轻易分解。

在 T-OZON 流程中,反应物的次级废物是 O_2 、 CO_2 和 H_2O ,并且大大减小了次级废物的体积。

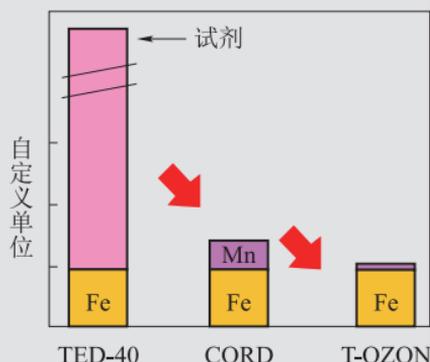
T-OZON 化学去污工艺的主要特征是:

- 高去污因子;
- 最小的二次废物体积;
- 对设备材料完整性没有负面影响。

实验室测试结果



二次污染体积



应用 T-OZON 去污流程的一个例子是该技术在滨冈 (Hamaoka)3 号机组(沸水堆,1 100 MWe)主系统(主回路再循环管道-PLR;反应堆水净化系统-RWCU;余热排出系统-

RHR)的应用。使用该去污工艺,得到的不锈钢和碳钢的平均去污因子分别为 16 和 7,干井内的剂量率水平减少了一半。与之相对应,随后检查工作的剂量率降低了 280 人·mSv。T-OZON 工艺的一个主要特征是最小的二次废物体积,在上述应用产生的二次废物仅是 2 m^3 的离子交换树脂和 0.4 m^3 的废过滤器滤芯。

美国:化学去污(Susquehanna 核电厂)

经过 2004 年的全系统化学去污和贫化锌注入,Susquehanna 核电厂 1、2 号机组(沸水堆)得到自有记录以来最低的再循环管道接触剂量率,该剂量率为 15 mR/h。得益于一系列的核电厂管理创新,该核电厂的辐射源项大幅减少。包括:

- 冷凝液过滤(1999 年 6 月);
- FW 离子注入(1999 年 7 月);
- HWC(1999 年 8 月);
- 化学去污(2001 年 3 月);
- GEZIP(DZO)(2002 年 12 月);
- 化学去污(2001 年 3 月)。

Susquehanna 核电厂取得了美国沸水堆工业界较低的 BRAC 点剂量率水平,该剂量率为 15~25 mR/h(在再循环/上充管道)。Susquehanna 核电厂取得如此成绩的原因在于,在超过 5 年的时间里,该核电厂在全厂范围内采用有力措施减少源项。这一点值得借鉴。

系统冲洗

对系统和管道进行冲洗能够去除辐射源项和热点以降低工作区域的剂量率水平,这种方式是通过强制将管道内部积存的放射性物质冲到下游那些不影响工作人员的区域来实现的。冲洗

可以有多种路径,通常情况下,冲洗终点是废水处理系统或冷却剂净化系统。有效的冲洗程序的要点包括,放射源的早期识别,流程制定,运行部门的支持以及工作计划执行窗口的保证。为使剂量减少达到最优,应根据相关工作计划考虑冲洗时机。通常情况下,合适的冲洗窗口是在机组停堆大修的早期,这对只能在反应堆压力容器封头就位的时候进行冲洗的电厂尤为重要。另外,处于全系统压力及温度下,且在最大流量时,系统冲洗最为有效。

管道加压冲洗去除的那些对局部区域剂量率有贡献的放射性物质被过滤捕集,或在整个反应堆压力容器、堆芯外管道或水箱内重新分布。加压冲洗使用高压水(70~1 500 bar/1 000~20 000 psi)可将放射性沉积物、废渣或树脂材料从反应堆水池、管嘴热套管、水箱喷射器和其他死管段或淤积物沉积区冲洗出来。主要热交换器在维护或检查工作之前的冲洗可以在很大程度上降低剂量率以及整个任务的剂量。经验证,带有专门喷头的高压(800~1 000 bar)水冲洗对准备管道更换时也非常有效。因为这种冲洗可以降低剂量率,减少个人防护设备的使用。

当加压管道系统贯穿到反应堆压力容器内部时使用水下真空吸尘器。吸尘器收集和过滤那些被水枪冲出死角的放射性粒子,并限制对压力容器水透明度的影响(通过去除在水中再悬浮的放射性淤积物来实现)以及对大修关键路径时间的影响。需要注意的是,如果在合适的地方放置冲洗接管,可以实现局部系统的冲洗和/或去污),以减少剂量。

冲洗和加压去污作用的缺陷在于,如果没有可用的过滤系统,大部分的放射性物质只是暂时被移除,当这些放射性物质重新分布时,可能会对其他区域的工作人员造成更高的剂量率。

日本:换料期间 RPV 的去污控制

为打开沸水堆的反应堆压力容器封头进行换料,RPV 必须充满水。在提高水位的过程中,如果反应堆水中的放射性淤积物进入到主蒸汽管道,则主蒸汽管道,释放阀和隔离阀可能会被污染。如果发生这种情况,放射性水平将会升高。在日本,为避免沸水堆发生此类情况,在用水将 RPV 充满进行换料之前,先将干净的补充水注入主蒸汽管道系统。注入的补充水填充到主蒸汽管线,直到水位到达补充水可以进入 RPV 为止,从而避免了受污染的水进入主蒸汽管线可能引起的污染。这将降低主蒸汽管线阀门(释放阀和隔离阀)附近的剂量率,并且允许在这些阀门附近的工作人员减少对个人防护服的依赖。

表面去污技术

一些非破坏性的机械去污技术可以去除那些黏附在表面的污染物,无论这些污染物是紧密或是松散的黏附在表面。本节讨论了其中的一些技术。

高压水去污技术对于减少设备表面、水箱或换料水池中松散黏附的污染物非常有效。高达 250 bar(对于人工操作)和高达 1 000 bar(对于远距离遥控操作)的水枪使去污工作有效,且成本极低。

磨砂抛光技术使用玻璃或塑料小珠以实现高的去污因子,有效降低了带有氧化层(来源于主冷却剂)的表面的剂量率。然而,由于这种技术磨损度极高,因而,并不适用于那些敏感表面。一些抛光喷砂介质可以重复使用,只要这些介质在技术上仍然有效。一种自动分离工艺可以将污染的物质从所用材料中分离。

CO₂ 清洗技术是一种气动干工艺流程,使用干冰作为去污媒介。虽然类似于传统的抛光技术,但该技术并不使用那些危险的或研磨性的介质,因此适用于敏感的设备,比如电子设备等。另

一方面,对于厚的氧化层,该项技术的去污效力较低。虽然对于去污控制,需要一些专门的通风措施,但该技术并不产生大量的次级废物,比如水或者研磨介质等。该技术对于软材料(比如木头、橡胶和塑料)的去污,或者去除油漆或涂层非常有效。

冰抛光技术是湿工艺流程,使用小球状的冰作为清洗介质。抛光技术使用一台制冷单元和磨冰装置制造冰片,冰片使用压缩空气喷到受污染的表面。这样的系统可以使用机器人操作,每小时大约生成 60~90 升的水。冰抛光技术的固有安全特性包括:不需要过分关注热应力、湿环境中较低的气载水平以及较低的喷嘴冲击以缓解操作疲劳。该项技术的缺点是,与传统方法相比去污速率较低并且噪音水平很高(典型在 110 dB)。

超声波去污技术是一种在水环境中使用超声波的物理去污手段。超声波发生器产生频率在 10~100 kHz 之间的超声波,变频器将这种高频率的能量转变成相同频率但振幅低的震动。大量微小气泡的形成和剧烈破碎将放射性核素带离物体表面,从而实现去污。

燃料元件超声波去污技术是一种去除 PWR 燃料元件表面沉积物,从而减轻 PWR 反应堆堆芯中轴向功率偏移(AOA)潜在问题的有效方法。另外,减少燃料元件沉积物已被证明可以降低随后停堆换料的剂量率水平。目前,燃料元件超声波去污技术对于降低辐照水平也非常有效,因为它去除了燃料元件表面的沉积物。另外,燃料元件超声波去污不会产生其他任何额外放射性废物。虽然该项技术是针对 PWRs 发展起来的,但业界认为,该项技术应用于沸水堆将带来以下好处:

- 改善高离子水平核动力厂潜在沉积相关的燃料元件问题;
- 由于最大来源的去除,反应堆水中 Co-60 的浓度会降低,从而降低辐射场并减少贫化铀的需求量;
- 在注入贵金属之后减少了燃料元件上贵金属的装载,提高了贵金属在反应堆内部设备表面上的相对比例。

日本:抛光去污

从1990年开始,日本发展了多种先进的使用冲击进行去污的方法。其中的一种技术是将喷气(CJ)技术和抛光技术结合使用。通过适用性测试,研究人员发现结合的去污流程的效率高于各自单独使用的效率。以下表格展示了采用实际设备进行适用性测试的结果。

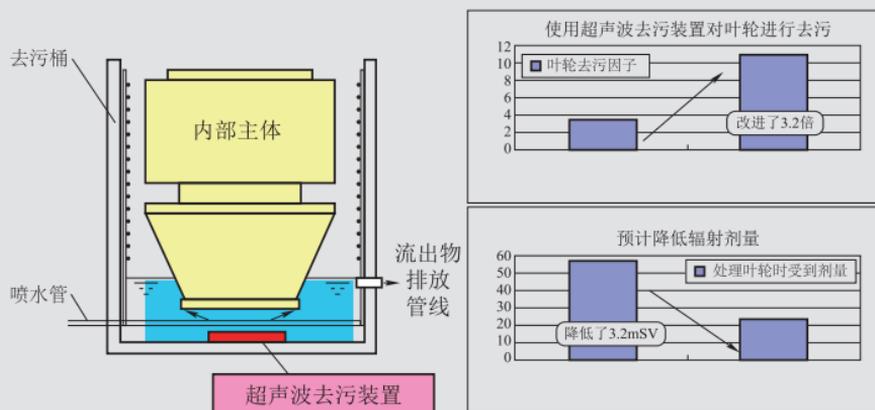
喷气+抛光技术结合的去污技术适用性测试结果

	去污前	去污后	去污因子
样本 1	40 mSv/h	0.7 mSv/h	166
样本 2	25 mSv/h	0.63 mSv/h	111

日本:采用超声波去污技术对反应堆主泵去污

大饭(Oh)核电厂已使用化学清洗和高压水对RCP(冷却剂主泵)内部进行去污。超声波去污技术在另外一座核电厂已经使用并证明有效,Oh核电厂超声波去污技术以一种经济有效的方式引入去污水箱以增强去污能力。预计该措施可以将剂量减少32人·mSv。示意图如下所示:

用于废物桶去污的超声波去污装置介绍



目前:单独的化学去污(高压清洗)不足以清洗构件内部

改进:超声波去污装置的有效性已经在桶去污中得到证实,去污装置增强了桶构件下部内表面的去污效果

预计降低
32人mSv

罗马尼亚:Cernavoda 核电厂去污技术

去污需要耗费时间和金钱,并且有可能使工作人员暴露于辐射剂量以及化学和工业安全隐患之中。Cernavoda 核电厂并未发展复杂的去污技术,相反,创造了一种有效的去污体系。该体系首先基于实践原则(在工作区域通过减少或去除松散的污染物以改进工作人员的安全和健康条件),并且,该体系也减少了那些处置费用高昂的放射性废物。运行经验表明,当去污工作由受过良好训练的操作人员完成时,该体系可以取得最大的(去污)效率。该体系的成功之处包括:

- 最低的剂量和最好的工作质量;
- 需要的去污介质、水以及其他消耗品最少。

通过对去污放射源的准确了解(数据),以及对去污设备、工具、重复使用/再循环材料的使用制定合适的方案(策略),可以取得上述目标,并产生最少的二次废物。

美国:燃料元件超声波去污

在美国,燃料元件超声波去污技术已用于诸如 Callaway, South Texas 和 Vogtle 此类的压水堆核电厂。在 Callaway 核电厂,停堆时,对燃料元件进行超声去污处理后,剂量率降低了 50%。

水化学控制

水化学是实现化学控制的重要因素。有效的水化学控制可以促进源项的持续降低,预防活化腐蚀产物在设备和管道表面的黏附。这涉及在功率运行、运行瞬态、启停堆期间化学条件的最优化。部分核动力厂倾向于使水化学条件与初始水化学条件保持一致,以下小节则讨论了一些水化学控制方面的源项降低技术,这些技术已成功应用于部分核动力厂。

注锌技术

注锌是一种减少剂量率的有效方法,世界范围内,已有大量核动力厂成功使用该技术控制管道中放射性核素的黏附和积聚。该技术将 Zn 离子注入反应堆,提高了 Zn 在反应堆水中的浓度,以此控制了主管道和设备的腐蚀率。注入的锌在燃料包壳、管道及设备表面形成一层致密薄膜,减少了燃料元件中的钴向反应堆冷却剂的释放,从而减少了钴在管道和设备表面的沉积。从运行经验可知,通过控制腐蚀率,可以控制放射性核素在管道表面的黏附/积聚,从而控制了表面剂量率的增加趋势。

特别的,在沸水堆中,为应对应力腐蚀断裂(IGSCC),需要注入氢气,而氢气的注入将增加剂量率,采用注锌技术可控制剂量率的增加。在美国,经常一起注入锌和其他的贵金属材料。最初的注锌使用的是自然的氧化锌(ZnO),在反应堆中,Zn-64 活化为 Zn-65,与控制 Co-60 相关的剂量率的降低部分的被 Zn-65 产生的剂量率抵消。因而,在一些情况下,注入的是已通过同位素分离技术去除了 Zn-64 的贫化氧化锌(DZO)。

高锂运行和富集硼的应用

压水堆的高 pH 运行可以使照射降低。以日本为例,压水堆是在一个高的 pH(目标是在 285 °C 时 pH 达到 7.3)下运行的。该方法使用锂作为 pH 调节剂,通过增加锂来控制 pH 值。由于运行周期开始时硼浓度非常高,因此,研究人员研究了在整个运行周期期间作为 pH 优化手段的高锂运行的适用性。此外,考虑到减少反应堆水中的硼浓度,研究人员也研究了作为化学补偿控制材料的富集 B-10 的应用。

溶解氢浓度的最优化

在压水堆中,主冷却剂在辐射分解作用下会分解出氧气,水中溶解的氧会导致反应堆结构材料发生应力腐蚀断裂(SCC)。可以向主冷却剂中增加氢,通过抑制氧的产生来预防 SCC 的发生。

通过对溶解氢浓度的合理控制,也可以控制沉积物的化学组成。考虑到这两方面的作用,美国和日本已研究了溶解氢浓度的最优化,目的是控制 SCC 以及降低剂量率。

Ni/Fe 控制操作

从保持燃料元件完整性以及减少辐射照射的角度来看,控制反应堆补水中的离子浓度是十分重要的。降低离子浓度的手段包括:注入氧以预防补水系统管道的腐蚀;安装凝结水预过滤器以去除凝结水中的离子;改进凝结水离子交换树脂净化技术。

有理论认为,通过平衡离子浓度使其与反应堆水中的 Ni 浓度成比例,可以限制燃料元件表面上的 Ni 和 Co 产生的放射钴同位素的释放。基于该理论,研究人员提出了 Ni/Fe 控制方法。Ni/Fe 控制方法的目的是使核动力厂运行时,在补水中镍浓度与铁浓度比值保持在 0.2 或以下。一般而言,带到反应堆的镍离子会与堆芯燃料元件包壳表面上的沉积物中的 Fe 发生反应,生成镍铁酸盐,黏附在包壳表面。其他化学性质与 Ni 类似的离子(比如 Co、Co-60 和 Co-58)也将生成铁酸盐,固定在燃料元件表面。从而降低了反应堆水中的离子状态的放射性的浓度。日本的女川(Onagawa)核电站 1 号机组和柏崎-刈羽(Kashiwazaki Kariwa)核电站 1 号机组(压水堆)首次使用该方法,效果显著,因而日本的大量新建核动力厂也采用了该方法。

极低浓度的 Fe 操作/高浓度的 Ni 操作

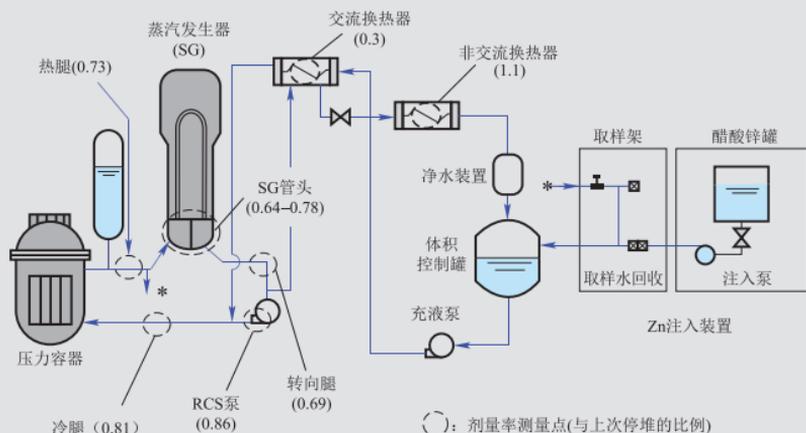
在一些日本沸水堆中,使用“BJ 燃料”(在高耐腐蚀燃料元件包壳内部有一层纯锆层衬里)的核动力厂发展出“极低浓度的 Fe 操作/高浓度的 Ni 操作”。这种类型的操作是两种不同概念的结合。其中的一种概念是,通过在最大可能范围内控制从补水到反应堆水传输的离子沉积物(补水浓度为 0.1 ppb 或更低)来减少产生的放射性,从而也控制了镍铁酸盐和其他沉积物在堆芯燃料元件表面的量。另外一种概念是,维持反应堆水中的镍离子浓度在

可能的最高水平,从而控制管道和堆芯之外的设备的腐蚀,减少反应堆水中的放射性核素在反应堆堆芯以外区域的黏附和积聚。该类型的操作已应用于包括 Onagawa 核电站在内一些核动力厂,并已证明其有效性。

日本:注锌技术(Tsuruga 核电站 2 号机组和 Fugen 核电站)

Tsuruga(敦贺)核电站 2 号机组进行了注锌操作,以评估该技术在以下方面的效应:(1)水化学;(2)降低主设备和管道的剂量率;(3)燃料元件性能。在第 14 个运行周期内进行了为期 8 个月的注锌操作,主冷却剂中锌的浓度是 5~7 ppb。虽然在注锌后,钴的浓度增加了一个量级,但这种增加在基于欧洲运行经验得到的预期值之内。另外,与上一次换料大修测得的剂量率相比,主设备和管道(热管段、冷管段和蒸汽发生器水室)的剂量率降低了 20%~30%。

主设备及管道中的相对剂量当量率

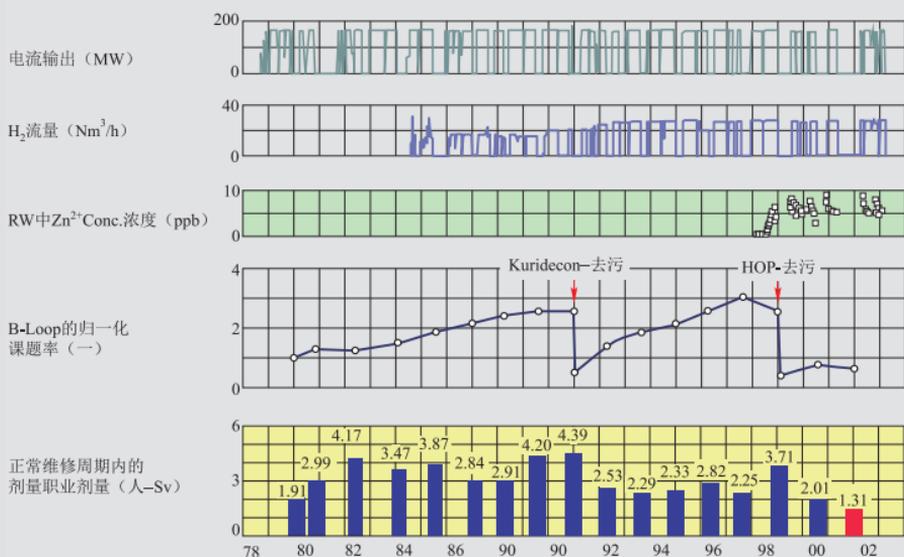


锌注入使主设备及管道的剂量率降低到先前停堆的70-80%,基于早先在其他场址的经验该效果高于预期,但锌注入对低温非交流换热器没有效果。

- Fugen(普贤)核电站在定期检查中使用剂量率控制技术作为减少照射的手段,该剂量率控制技术结合了

系统化学去污技术和注锌技术。Fugen 核电厂的反应堆是一种采用重水慢化、轻水冷却的压力管式反应堆，该反应堆是一种先进热堆的原型堆。Fugen 核电厂在 2005 年 3 月结束运行，其使用注锌技术的结果如下：

- 去污之后的注锌有效抑制了 Co-60 在管道表面的再次黏附，并使辐射源维持在一个较低的水平；
- 第 17 次和最终检查周期的职业照射剂量在整个 Fugen 核电厂运行期间是最低的(1.31 人·Sv)；
- 可以通过这些水化学控制技术改进实现核电厂永久和有效的剂量率控制措施，这样也可建立有效的照射剂量控制措施。



RW: 从纯化床入口取样的反应堆水

归一化剂量率=周期性维修的平均剂量率/第一次进行周期性维修的平均剂量率

反应堆水净化技术

在核动力厂运行时，不断抽取部分主冷却剂进行净化，以去除冷却剂中的放射性物质。冷却剂使用离子交换树脂和粒子过滤器进行净化。对于压水堆，冷却剂的净化也使用化学和容积控

制系统;对于沸水堆,使用凝结水去离子器净化汽轮机后的凝结水。

气载污染的通风和过滤

通风、过滤系统以及临时包容是控制气载污染的有效措施。合理设计和使用的通风系统(代表性的例子是采用 HEPA 过滤器)可排除工作人员(特别是那些工作在放射源区域附近的工作人员)采取呼吸防护装置的必要性。当选择通风系统设备时,必须考虑 HEPA 通风系统软管及通风橱的位置、通风橱的设计、通风系统的容量和捕集速度等要素。通风系统执行的功能也影响通风系统的类型。例如,研磨需要高的通风速率以捕集产生的物质。当需要考虑碘的放射性时,必须使用专用的过滤器类型(活性炭过滤器)。为确保以上过滤器的高效运行,必须避免那些损害过滤器性能的不利工况(高湿度、有机溶剂)。

停堆操作

适当的停堆工况下的化学条件,对于确保在停堆工况下影响主回路系统的剂量率水平和污染水平的主要参数,能够满足维持 ALARA 的要求是非常必要的。

过氧化氢的注入

氧化操作可通过加速管道中放射性钴同位素的溶解和加大净化系统的流量,实现放射性去除。在这种工艺中,当主系统成为氧化环境时,镍、Co-58 等快速溶解,其在冷却剂中的浓度相应增加。然而,溶解速率随后减慢,通过净化,离子浓度将进一步降低。为加速离子浓度的降低,可以进行全部水的氧化操作。对于压水堆,在停堆期间,当主冷却剂系统排水时,已经完成上述流程。在主冷却剂排水之前,通过向水中添加过氧化氢(双氧水)使主要系统处于氧化环境。由于这种方法在不损害保护层(内表面氧化层)的前提下,去除了金属材料的外表面氧化物,而外表面是放射性沉积物的来源,因而这种方法被称作“外表面沉积物去除

法”，并已用于许多核动力厂。

法国:停堆程序

一项 EDF 针对停堆程序及其对剂量率潜在影响的研究表明,对限制主回路的放射性沉积有贡献的主要步骤如下:

- 温度以恒定速率降低;
- 向主回路系统引入足够的双氧水;
- 净化的持续时间(对于 900 MWe 的核电厂,至少为 15 小时)。

日本:RHR 系统的运行起始温度

日本的沸水堆在核电厂停堆期间采用了一种方法以降低余热排出(RHR)系统运行起始温度,目的在于降低该系统的剂量率。该方法的出发点是放射性在 RHR 系统管道的沉积量与反应堆冷却剂温度相关。一项针对 Kashiwazaki Kariwa 核电厂 5 号机组的调查表明,当运行起始温度在大约 120~150 °C(初始值)的范围时,放射性在 RHR 系统管道的沉积量是一个常数,但当温度低于 120 °C 时,沉积量将会减少。另外,将运行起始温度从 150 °C 降低到 105 °C 时,由于沉积导致的剂量率的增加将会减少到原来的 1/4。

美国:Braidwood 核电厂的“交替停运”或“低水量”法

为减少停堆期间工作人员的辐射照射,Braidwood 核电厂采取了一种交替停运的方法。该方法来源于核电站辐射防护部门内部讨论,当回顾过去的大修执行情况,辐射防护部门提出了隔离蒸汽发生器、稳压器和其他在添加过氧化氢进行强迫氧化过程中出现污染和辐射水平提高的相关管道的可能性。Braidwood 核电厂通过在强迫氧化之前关闭回路隔离阀门(LSIVs)进行交替停运。这种操作使停堆期间蒸汽发生器和稳压器水中的放射性保持在较低的水平,与正常

停堆相比,需要净化的水的体积也有所减小。由于净化阶段净化水所需时间更短,同时减少净化期间需要限制进入的相关区域,交替停运的方法最终减少了辐射照射,并提高了核电厂工人的生产效率。

该方法显著降低了核电厂的剂量率。蒸汽发生器、稳压器、相关管道区域以及受这些部件影响的一般区域的剂量率会降低 30%~50%。该方法已经是 Braidwood 核电厂进行放射性工作时减少职业照射的常用手段,并已用于其他 Exelon 核电厂。

6.4 照射降低技术

以上章节介绍了去除或减少放射性源项本身的技术,除此之外,也可以采用照射降低技术减少工人所受的照射。照射降低技术利用的是时间、距离和屏蔽原理。

临时辐射屏蔽

临时屏蔽的使用(特别是在换料和大修检查期间)是降低特定区域和一般区域工作辐射水平的主要方法之一。使用临时屏蔽最多的区域包括沸水堆的干井和压水堆的蒸汽发生器以及主回路管道。许多核电厂在大修期间在各种管道上安装了超过 25 t 重的可移动屏蔽设施。如沸水堆反应堆冷却剂系统、净化系统和再循环系统的不同管道上,压水堆的主回路上。有效的临时屏蔽需要一个包含不同防护部件的灵活体系,以便在不同现场条件下取得最好的防护效果。由于工作区域狭小,需要留给操作人员以足够的工作空间,因而,使用临时屏蔽应注意节省空间。有效的临时屏蔽部件的典型例子包括:

- 铅绒或铅毯(铅包装在聚乙烯材料中以便去污);

- 铅皮(厚度为 5~10 mm);
- 针对重复性工作的专用铅/铁防护部件;
- 高密度(19.25 g/cm^3 , 铅的密度为 11.34 g/cm^3)的钨;
- 混凝土块(有不锈钢衬);
- 水屏蔽(容器为塑料聚合物/树脂类型);
- 含铅发泡剂。

这些部件的支撑装置包括专门的便捷快速连接脚手架,这些脚手架带有屏蔽支持架、钩及带子以便在管道或支撑件上直接安装。临时屏蔽的应用取决于想得到的剂量率水平的降低量、核动力厂配置和直接屏蔽时可允许的管道载荷。

虽然大部分的临时屏蔽仍然使用的是脚手架构件支撑的铅皮防护,但其他替代方式也同样可行。直接屏蔽包括铅或铁环环绕着管道或包裹大型阀门。由于瓶状容器具有重量轻,并且允许远距离充排水操作,因此,从安装和移动的角度来看,水屏蔽降低的剂量可能要高于铅皮降低的剂量。

停堆换料及检修期间进行的临时防护项目的关键方面包括:工作范围的审查,工作区域的特征(布置和配置)、成本-效益的评价、工程分析以及防护需求的计划。为在短时间内安装防护部件,需要适用范围广的防护构件和一个可以确定最优防护方案的受过良好训练的防护团队。一般来说,为确保临时屏蔽的支撑部件在核动力厂系统和管道上产生的可允许的重量荷载,需要进行工程分析。应记录所有大修临时屏蔽体的总和,以确保每个系统总的重量荷载在允许的工程限值之下。

在一些国家,有专门雇佣熟练工艺和技术人员的承包商,承包商人员使用精确的安装规程、剂量率监测值以及照片/可视文件进行便捷的防护操作。这些团队在大量停堆检修期间进行的工作中获取了丰富的经验,在此基础上,结合辐射防护和其他实践知识,发展出安装临时屏蔽的最优化工具。在一些核动力厂,

这些专业团队已将年大修剂量降低了大约 5%~10%。

一个最优化的防护项目应有合适的工作计划的支持(参见第 5 章)。当没有工作进行时,向管道充水或从管道排水,不需要任何成本,并且可以消除安装大量临时屏蔽的必要性,从而降低了与安装防护相关的集体剂量。然而,应当注意到,水并不能显著降低那些直径小于 10 cm(4 英寸)的管道剂量率水平。

另外一个用于高剂量率水平核动力厂的实践范例是在经常工作的区域附近建立屏蔽等待区。在工作间歇、技术讨论时,操作人员可以在这些“辐射屏蔽区”等待。典型的“辐射屏蔽区”是在 PWR/BWR 安全壳的内部或在 BWR 干井内部/附近。

亚洲地区:临时防护

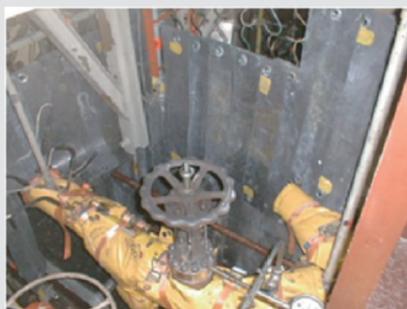
在一些亚洲核动力厂,首先必须完成安装屏蔽体的代价-利益分析,以此作为降低剂量的工程支持。根据系统、部件和工作环境的具体需求,经常使用铅皮、可移动铅墙、铅砖、钨片和水箱。屏蔽支撑被设计为永久性的设备,以便于铅皮的安装,使安装人员所受的剂量最少。对于高放射性区域,为减少集体剂量,经常设置临时屏蔽和半永久性屏蔽设施。大修期间热点地区高剂量率管道的防护经常使用专门设计的钨铅毯。由于钨毯由钨和聚乙烯材料以特定比例组成,非常柔韧,可以弯曲以覆盖热管段。为降低高辐射工作区域的放射性水平,尤其是在换料大修期间,可以在反应堆冷却剂系统主要的相关管道和设备上安装临时的铅防护设施。根据辅助厂房(比如 RHR 和有高辐射管道的蒸汽发生器间)的工作环境,也已经安装可移动和固定式的屏蔽设施。

比利时:大修期间的生物屏蔽(Doel 核电厂)

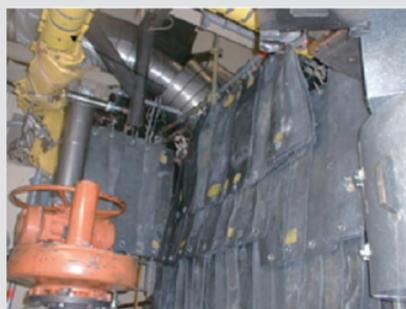
在 Doel 核电厂,指定安装生物屏蔽设施的人员受到极好的训练,具备非常好的安装资质。经过数年,这些人员隶属

的公司已为机组大修之初的生物屏蔽设施的安装发展出一套标准程序。实施该程序的技术人员同时也是辐射防护工作人员,他们是辐射防护工作人员和承包商之外的,唯一获得授权进行特定剂量率测量的工作人员。在大修开始的前两天内安装所有的生物屏蔽设施。只有辐射防护部门被授权可以移动生物屏蔽设施或改变附近标识(指示热点、区域分级等)。

在管道内部安装生物屏蔽以确保对阀门的监测



管道内部的Bracelet类型防护



加拿大:新型防护材料(Pickering B 核电站)

在 Pickering B,核电厂需要更轻、更有效的辐射减弱材料以替代传统的 PVC 铅包,受此需求推动,开始使用新型防护材料。最新的辐射减弱材料使 50~200 微米的钨颗粒均匀分布在有弹性的硅基材中。这种形式可以达到一个半减弱层为 2.5 cm 的效果,并能够进行模具成形,可以为形状不规则的设备提供灵活的辐射屏蔽。

法国:防护安装的最优化

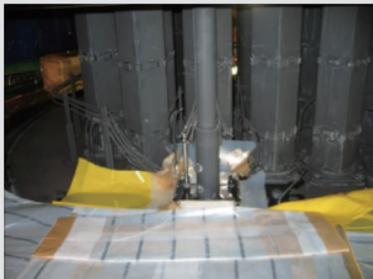
EDF 在其 PANTHERE 剂量率模拟软件的基础上,为主回路上的屏蔽安装发展出一种确定最优序列的方法。一些 900 MWe 的核电厂已使用了这种方法,实践表明,在这些区域进行的工作的剂量可以减少大约 30%。

日本:RV 堆内构件更换的临时屏蔽(Ikata 和 Fukushima Daiichi 核电厂)

2004年,日本的伊方(Ikata)核电厂(四国电力公司)完成了世界上首次RV堆内构件更换(CIR)。CIR工作总的剂量低于计划值的1/10。这次成功有两个主要原因:i)旧的CI贮存容器剂量率水平的实际值为设计值的1/3;ii)采用多种措施减少辐射照射,这些措施包括临时屏蔽。临时屏蔽安装在多个位置,比如堆腔等待区、围绕反应堆压力容器封头的区域等。为RV堆内构件更换所设的临时防护如下所示。

1998年,Fukushima Daiichi 3号机组进行了日本沸水堆核电厂首次反应堆内构件(围板)更换。更换时,采用临时屏蔽以降低总的剂量。本次反应堆内构件更换采用的临时屏蔽如下所示。

RV芯构件的临时屏蔽



堆内构件的临时屏蔽(BWR)



瑞士:大修期间的铅防护(Beznau 核电厂)

在Beznau核电厂,生物屏蔽设施最初只安装在维护和监测区,使用铅的量非常少。20世纪90年代初,工作人员发现,安装铅屏蔽的人员受到的剂量远小于通过安装铅屏蔽为其他操作人员带来的剂量减少。因此,在1999年2号机组更换蒸汽发生器时,为大修而安装的生物屏蔽的量增加到120 t。一直到2000年初期,每次大修平均使用的铅的量在

80 t 左右。随后提出了一项新的政策,即:大修期间,只在进行工作的区域安装生物屏蔽。该项政策在不增加维修工作集体剂量的前提下,将每次大修使用的铅的量减少到大约 40 t。

美国:工人通行的临时屏蔽(Cook 核电厂)

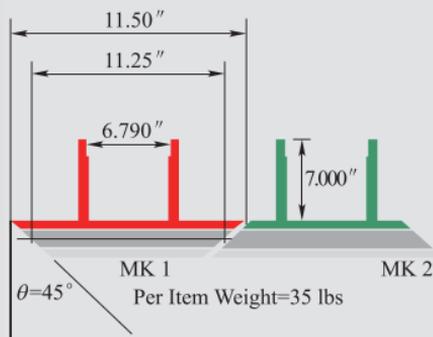
美国电力 Cook 核电厂采用了若干方法解决临时屏蔽安装的问题。例如,在安装临时屏蔽时,工人的通行剂量是一个很大的问题。在安全壳下部空间安装临时屏蔽时,搬运屏蔽设施的操作人员的最短路径是通过安全壳下部的空气闸门,然而,这种路径需要操作人员穿过一些较高的辐射场。为消除这种剂量,使用起重机,通过安全壳上部的进出通道和地面进出通道搬运防护材料。并且,在大修早期阶段对高频率使用的通行路径实施屏蔽以尽可能减少照射。此外,也使用了快速安装和移动水防护以及永久性屏蔽支架。这些屏蔽是在那些每次大修时均系统使用临时屏蔽的工作区域。

永久辐射屏蔽

在换料大修时经常安装临时防护,这些临时防护十分有效。一次性安装的永久辐射屏蔽适用于如下情形,即:对于一个给定的任务,操作人员总的照射量的减少与安装屏蔽时操作人员受到的照射量相比很小的情形。例如,在高剂量区域和很难到达的地方安装屏蔽时,安装人员会受到大量照射。在安装永久辐射屏蔽时,必须考虑屏蔽的稳定性和安全性,包括抗震安全。为便于进出通道或其他进出口开展管道和设备检查工作时,采用部分可移动的永久防护,也可有效降低剂量。

加拿大:CANDU 堆的面防护(Pickering B 核电站)

CANDU 堆使用的反应堆屏蔽盖是一种呈正方形的防护设备。该设备由铝合金(0.5 英寸厚)和塑料组成,铝合金被夹在两片塑料中间。每个屏蔽盖的四条边切成斜角,与相邻屏蔽盖的棱咬合,形成互锁结构。一旦安装,这种结构将使屏蔽盖间的缝隙最小。实践证明,防护盖在降低一般辐射场和射线束辐射方面表现极佳,可以持续降低辐射水平。这种防护手段已在之前的压力管更换工作中得到成功应用。



德国:可移动的防护和永久的脚手架(Philippsburg 核电厂)

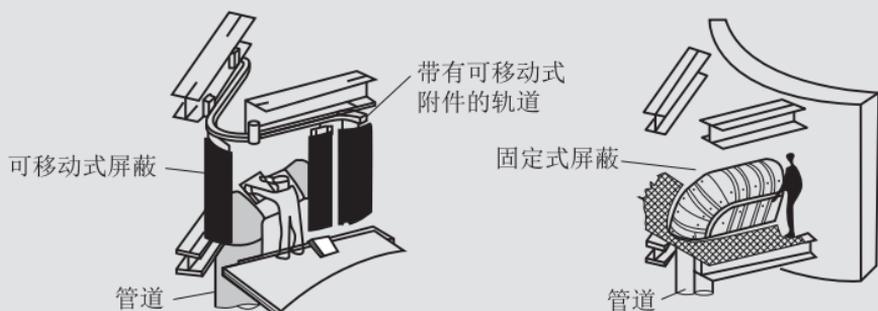
Philippsburg 核电厂组建了一个工作小组来研究可移动屏蔽时,发展出准“固定安装”的屏蔽。如果有必要对操作人员进行长时间的保护,将可移动屏蔽设施转变为固定屏蔽设施;但应验证这些设施的稳定性以及地震引发的与安全系统冲突时的足够的安全性。

大修期间,在永久高剂量率的区域,维修工作需要永久脚手架。如果检查并验证确有必要,脚手架可以永久性的安装,永久安装的脚手架需要考虑稳定性和地震准则下的可能工况。通过这种方式,可以降低由于每次安装和拆除脚手架时造成大约 2~3 mSv 的集体剂量。

日本:可移动的永久屏蔽

一些日本沸水堆安装了“可移动的永久”屏蔽措施以减少维修工作期间安装和移动屏蔽的时间并降低相应的职业辐射照射。与传统屏蔽体系(铅皮和铅毯)相比,这种措施的工作时间降低因子能达到 10 到 20,剂量率减少可达 20%。

可移动的永久屏蔽措施在设计上能够保证易于到达将要检查的管道和设备。可移动的铅毯悬挂在永久安装的抗震横梁和横杆上。毯子并排悬挂,通过使用底部固定设备以防止毯子摆动,这样在核电厂运行时,毯子可以依然保留。将毯子与底部固定设备分离后,毯子可以沿横杆充分滑动,以方便工人容易到达远处的工作地点,同时又可以提供一定的屏蔽措施。此种方式没有必要预留可移动的屏蔽拆除的堆放区域(不需要拆除)。在这些工作区域,毯子被密集放置为工人留下足够的工作区域。以下两图展示了传统屏蔽措施的工作区域和永久可移动屏蔽措施的工作区域。



西班牙:屏蔽措施的使用(Almaraz 和 Cofrentes 核电厂)

Almaraz 核电厂(压水堆)装备了大量的固定生物屏蔽措施(25 t)。固定生物屏蔽也安装在那些对周围剂量率有贡献的管道和阀门的周围。其中的部分屏蔽措施装备了通道并能够开启,以便进行阀门检查。由于安装了大量的固定生

物屏蔽,因而,机组大修期间所需的生物屏蔽措施非常少(大约为 6 t)。

Almaraz核辅助厂房内管道的
铅永久屏蔽



Almaraz核电厂的生物屏蔽体带
有一个通道口用于检修阀门



堆腔的防护进行了设计改造,在最大程度上降低反应堆厂房堆腔内的 γ 通量和中子通量。设计改造的目的是将反应堆冷却剂排水槽(RCDT)和 INCORE 设备通道墙壁之间的空腔填满。因为应用 LBB(先漏后破)技术方案,不再需要堆腔,堆腔采用一块金属平板封闭(由金属片固定的混凝土填满腔体),在压力超过 2 psi(LOCA 基准工况)时打开。Almaraz 2 号核电厂 2001 年的第 13 次大修和 Almaraz 1 号核电厂 2002 年的第 15 次大修期间完成了这种设计变更。改进工作期间所受的内/外照射剂量可以忽略。功率运行时,反应堆冷却剂排水泵的维护通常会造成个人和集体照射剂量,完成设计变更后,个人和集体剂量明显降低。改进前和改进后的辐射水平如下表所示:

运行模式	腔内的辐射水平(mSv/h)			
	γ 辐射		中子辐射	
	设计变更前	设计变更后	设计变更前	设计变更后
装料	10.0	0.06	—	—
运行	26.0	0.10	48.0	0.025

在 Cofrentes 核电厂(沸水堆),干井内多达 80% 的三年一次的剂量来源于再循环系统和净化系统。永久性防护措施安装在路径区和停留区,相对于历史的辐射水平,屏蔽后的剂量降低了 50% 以上。与临时防护措施相比,永久防护措施的安裝风险小,对工人的辐射影响也很小。永久防护措施由铅毯组成,铅毯上面覆盖了不可燃的帆布,并固定在辅助结构上。

屏蔽前剂量率(mSv/h)	屏蔽后剂量率(mSv/h)
0.7	0.42
2.86	0.36
1.1	0.3

远距离操作

剂量的降低可通过减少物理放射源项或者使用屏蔽来实现,此外,在一些场合,还可以通过增加人员和照射源之间的距离来实现。一些可以考虑的方法包括:在工作地点之外预先制造或装配设备或组件;将厂内部件转移到低剂量率区域或者机械维修车间展开工作。安装部件之前,计划人员、设计工程师和维修技术人员负责识别那些可以在辐射区域之外的机械或电气车间进行制造的部件。这种技术已得到成功应用。例如,管道卷轴、法兰焊接、管道支柱和阀门执行机构的布线的预先制造都使用了这种技术。如果安排合理,大量的焊接工作可以在放射区域之外进行,而不必面对复杂的工作条件,承担辐射照射。除了可以降低剂量,这种技术还可以提升质量、减少返工。

另外一种有用的技术是在维修时,将部件从高剂量区域移到低剂量区域。该技术的范例包括保养时移动阀门执行机构、加工时移动阀门阀瓣以及检查时移动泵电机或泵。对于维修工作,设

备可以方便地移到附近低剂量区域或移到热机修车间进行。

6.5 工具和设备

热机修与去污车间

为了维修控制区内被污染的内部构件、备件以及工具,热机修车间是必要的。维修工作中,含控制区的热机修车间的存在,可避免污染部件的去污操作,以及向非放射性车间转移放射性设备进行维修。一个装备完善的、和非放射性车间质量一样好的放射性车间,能够提高维修质量、节省时间、降低成本。而专用设备能够对即使很复杂的部件进行维修。

通常在压水堆和沸水堆核动力厂设计中,均配置有专用去污车间。相关设备放置在离热机修车间很近的地方,为所有设备或可移动的内部构件(可能是拆卸后可移动的)以及工具服务。已经证实这些设备能有效地降低剂量率与污染水平,将剂量率与污染水平降至可在热机修车间或工作区域里易于操作的水平,从而减少维修工作期间所受的照射量。将热机修与去污车间设置在邻近的位置上也会为维修提供方便并降低工人受照剂量。很多在工作区域不能被操作的设备,可进行去污,这些设备包括:

- 大部件的去污室;
- 小零件的去污箱;
- 用于超声波去污、(电)化学去污的不同尺寸的水槽;
- 去污室(箱)中所用的高压水喷射系统(130~250 bar);
- 去污室(箱)中所用的喷射玻璃珠、钢珠等的打磨抛光系统。

专用工具

为了保持工人维修时所受照射剂量合理可行尽量低,合适的工具是基本、必需的,并且在制订计划的过程及最终的工作计划

中,应该确保全体工作人员能获得其工作所需的合适工具。工具的有效性、控制管理以及场地管理程序的制定,应防止由于不充分的工具供给或将工具遗留在放射性区域需要由支持人员清理掉而造成额外的剂量。与工程控制相关的工具作业,有以下几个重要的方面需要考虑:专用工具的识别、采购或开发、及使用训练。

降低剂量的专用工具的例子有:可自动/远程切割、磨光以及焊接机器设备,远程控制在役检查设备,远程控制的阻尼器定位/升降工具等。许多类型的这种专用工具的作用都是相似的,经适当的选取、组合可以节约时间、降低剂量。通常,空气电弧切割要比氧乙炔气割迅速。像装在拉杆上的镜子这样的小工具,能使检查那些难以触及区域的难度有所降低。还有一些其他的工具帮助操作人员更容易地接近目标物,包括:电动起吊车,梯子(可以降低来自搭建脚手架的剂量),装在长拉杆上的摄像机(用以高处视觉检查)。通常可以考虑以下三种主要类型的专用工具:

- 用来支持控制和维修的固定支撑物:“固定支撑物”是一种灵活的系统,在其上可以安置几种不同种类的工具,以用于不同类型的操作。(如:同一个支撑物可以用于蒸汽发生器下封头以进行涡流探伤和探测堵管等不同情况)。
- 修理工具:它只能用于同一种类型的操作。(如:开启/关闭反应堆压力容器上封头的螺栓)。
- 用于照相机辅助检查或无损探伤的工具(如:用于在封头部位实施涡流探伤的“RITMIC”操作装置)。

为了完成某些场合中的修理、检查和更换等工作,高度专用、精密尖端的工具被研发出来。为了测试此类工具,可采用实际模型的模拟操作来确保其应有的机能,同时也能帮助操作人员熟悉、精通该种工具。这两方面也有助于避免在关键路径中发生意外并减少剂量。

加拿大:实时氙与常规测量数据显示

作为监管要求的一部分,放射性风险水平须能以一种持久稳定、清楚的方法呈现出来。传统上,是用大的可擦除的图板作为显示媒介。如今,安大略电力公司使用的是,通用网络协议(IP)技术和用计算机或芯片作为IP引擎的电子液晶显示板系统。对应位置的测量人员得到的测量结果,与远程持续性测量系统 RARMs 所有测得的包括氙水平数据在所有机组气闸门处实时显示。

日本:专用清洁器(配有刷子和高压管嘴)

日本的沸水堆中,冷凝水除盐装置的净化涉及几百种组件,每个组件都需要工人手工用刷子来清理,这些合同工人需要戴上全护式面具、穿上塑胶防护服。过去,这项任务需要4名工人用7天来清理两个除盐装置树脂罐。鉴于这种清洁方式需要过长时间,工作人员受到过多照射,于是东京电力公司开发了一种特殊的清洁器并在福岛第一核电厂有应用。这种清洁器配有刷子和高压水喷嘴,封装在一个配有通风的小箱子中。这种清洁器已将清理部件所需要的时间缩短了80%,并且不再需要呼吸器和塑胶(穿在外面的)制服了。工人的身体负担和人们对清理工作的消极印象,也得到有效的改善。

	手工刷子	清洁器箱
清除 432 冷凝器内的核素所需时间	127 小时	26 小时
所需的塑胶防护服及呼吸器的套数	56	0

机器人技术

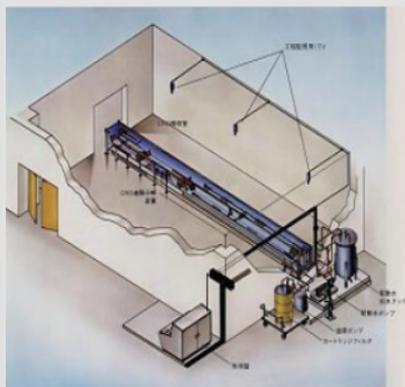
为核工业所研发出来的移动式遥控装置(机器人)和远距离操作装置,在放射性废物处理、水下检查、设备去污、对高放射性

区域的监察以及辐射巡检等领域中,已得到有效的应用。要完成在高放射性区域的修理工作,比如反应堆内部,遥控常常是唯一的解决方式。为了在严重事故后进行干预,机器人是很适用的,它们能越过阶梯,在水面以下执行潜水活动,以及携带照明,照相机和辐射探测器。机器人也可以执行小的任务,比如材料/设备的回取工作。另一方面,有机会研制开发更为精密尖端的工业机器人,用在例如设备去污或更换后的管道等高放射性危害的区域。

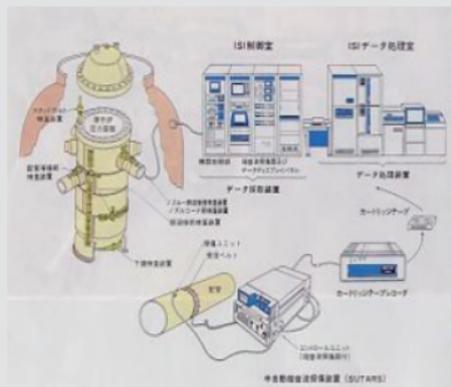
日本:东京电力公司核电厂与九州电力公司核电厂的机器人

以下相关的机器人技术已被东京电力公司使用:

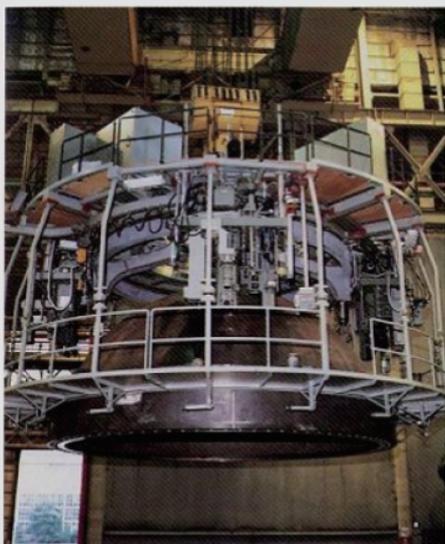
- 装卸料机;
- 控制棒驱动机构自动拆卸装置(控制棒驱动机构的遥控拆卸和清洁);
- 控制棒驱动机构操作设备;
- 反应堆压力容器超声波检测装置;
- 反应堆压力容器上封头螺栓紧固装置;
- 遥控操作交通工具。



控制棒驱动机构自动拆卸装置



反应堆压力容器超声波探伤装置



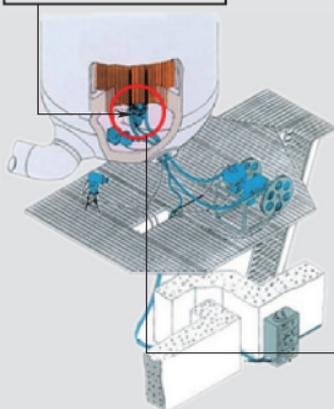
反应堆压力容器上封头
螺栓紧固装置



远程操作媒介

在九州电力公司的核电厂,机器人技术被用于蒸汽发生器传热管的涡流探伤检测。

检查机器人



检查机器人(细节)



6.6 人员防护器具

控制污染是降低工人放射性风险的基本途径之一。若能保持核电厂区域放射性方面的清洁,则可以降低对防护服和呼吸保护器的要求,这样就反过来提高了生产力。当生产力提高了,就可以节约时间和降低剂量。众所周知,防护衣具的使用降低了工作时的灵活性、舒适性和机动性,并且会给工人附加上一个热负荷。呼吸道保护器具(也就是:全护式面具,防护罩,防护服)既影响了工人的视线又干扰了语音交流。

当然,提供一个不需要防护服和呼吸道保护器的工作环境很重要。但是,有时个人防护器具不可避免地需要使用,这时在选择这些器具时,应考虑到放射性风险的特性,需执行的工作,以及对工作效率的影响。

6.7 工作场所最优化与任务协调

在任务准备过程中,一个总体的目标就是要最优化工作区域,进而使工作条件得到改善(亦可见第5章)。工作计划安排及工作准备要熟知在同一区域内涉及的所有操作。这一点,对于想要最优化所有支持活动和设备而言,尤其重要。比如:将大量放射性废物移除时,特别是维修操作过程所产生的高剂量率/高活性的废物,需要适当地进行工作准备和安排工作进度,从而将工作所在位置的剂量率维持在比较低的水平。从较大的管线上拆除保温材料时,计划的制订应该综合考虑保温层相关的工作。对于极高剂量率的区域(如反应堆压力容器内部),带有屏蔽的暂存容器准备工作也应该作为计划制订过程的一部分。

对工作场所最优化的直接影响因素,如任务总体安排或工作

准备效果是很难量化的。然而,通过对日常例行维修工作及事故后操作情况的分析,对这些难以量化的因素已引起重视。分析结果指出,与这些操作相关的集体剂量中平均 20%~30% 的剂量是由于意外或工作条件恶劣所导致(Schieber, 1994)。量化这些因素的影响是研究如何优化辐射防护行动的基本条件。此项研究不但可以用来评估能够降低多少剂量,还能够用于计算节省多少费用,这是因为,有时照射时间的减少意味着与此相关的操作成本也可能得以降低。

即使有了好的计划,仍然需要安排人员留在工作区域,以协调调整项任务的执行。这些区域协调者,需要将工作状况报告给大修控制中心。大修负责人在确保连续监控、对任务中的关键路径进行现场指导等方面,起到有效作用。现场操作人员所受剂量的有效测量,对于确保为整个任务制定的预期剂量的组成来说,是十分重要的。

积极采取工作过程管制的结果是,在某种程度上能得到电厂员工认同,辐射照射问题是核动力厂的一个“关键事宜”。不必要照射剂量累积会被追踪和被监督员追究到底,以确保避免事件的再次发生。

罗马尼亚:燃料转运通道检查

随着工作计划的发展,“燃料通道检查期间的辐射防护计划”被精心制订出来。在开始工作之前,在特定的区域里需要进行许多训练、练习活动,以模拟反应堆侧的特定状况。此项任务涉及了以下部门所指派的人员:燃料操作部门;检修部门;电气相关部门;辐射防护部门;以及 AECL 人员。这项任务按照计划持续执行:白班时,执行燃料通道的检查工作;而晚班时,对第二天要检查的通道进行相关准备工作。由于有放射性保护措施以及对工作任务所进行的操作实践,

使得人员的内照射污染的情况不会出现,也不会出现缓冲过渡区(Rubber area)外侧的污染物不受约束地自由扩散的情况。

6.8 小结

通过减少源项及照射量、提高工作效率从而使工作场所最优化是至关重要的。工作区域的剂量率水平,是需要控制并减少的对象之一。通过去除源项、采取屏蔽措施或持续控制来减少剂量,是非常有效的手段;准备好那些支持任务执行所需的各种各样的工具、设备也是有效的措施。由于很多有效的方法已被开发出来,而且已经积累了大量经验,所以应该利用好上述这些技术手段并将其纳入任务准备工作中,这是非常重要的。最后,像优化任务进度和工作区域内的任务协调,这种支持也是工作准备中的关键内容。

7 工作执行

在工作执行期间,最根本的就是确保对辐射防护进行有效的控制,使之一直发挥作用。这些管理不仅包括组织机构方面,如配备辐射防护工作人员、具有专门的操作规程,还包括技术方面,如远程监测的应用、入口控制系统等。这些控制的重要目的就是检查为确保职业辐射防护所计划的工作是否得到适当的执行,在需要时识别和采取纠正行动,并着手收集反馈经验。

7.1 简介

工作执行状态是指工作的实际开展以及在影响或促进工作期间所采取的那些行动。工作管理在多个领域均能有效地为降低剂量作出贡献,并能减少时间和费用。有效的工作流程控制将有助于确保在工作计划期间所设定的目标得到实现。通过为工人提供足够的放射性的、工作场所和工作岗位的特定信息,有利于降低转移照射和降低不必要的剂量。最后,反馈信息的收集将有助于实时的工作管理,并使将来的工作的准备更容易。

7.2 工作流程控制:职责的分配

工作流程控制(见 5.4 节)对于成功实施工作计划是非常关键的。由于这些控制会涉及很多人,因此明确建立各人的职责是很重要的,同时还要建立一个灵活的组织来协调工作并解决所遇到的各种问题。各部门之间的联系是一个重要因素。

任务经理(task managers)/岗位主管(job supervisors)

任务经理和岗位主管发挥着重要的作用,因为他们与执行工作的工人们直接接触。为有效地对工作进行管理,任务主管必须到现场花足够的时间,以熟悉(工作的)进展和(存在的)问题。在停运检修(outage)期间,在主管和辐射防护人员之间促成紧密的合作关系也是非常必要的。任务的领班(通常是合同商)必须能够认识负责收集与工作进展及所遇问题相关信息的任务主管,并与其紧密合作。为了解决这类问题,不同服务(工作)之间(inter-service)的沟通必须快速和有效。因此,认识那些协调信息(co-ordinate information)的人并向停运检修机构报告也是有用的。在工作领班层次上的剂量统计(dose accountability)对于任务层次剂量预算(task-level dose budgets)责任的完全承认是重要的。

每日的停运检修会议必须放在现场,在该现场能够实时解决所识别出的问题,同时,在该现场,非预期突发工作的计划以及非计划工作的下达都能与计划工作一样得到精心的安排(elaborate)(见第5章)。任务主管、辐射防护人员以及负责准备和进度安排的人都应当参加该会议。此外,在会议期间,将实际停运检修的剂量变化通报停运管理机构,并将该剂量变化与预期剂量相比较,也是非常重要的。在遇到某些问题时,在必要时可以考虑让合同商参与。

法国:任务前会议

在EDF,来自合同商和设施人员(保健物理学家、任务领班等)的代表汇集在一起,系统地组织两次会议,来识别任务特征和后勤需求(logistic needs):第一次会议大约在工作前一个月召开,第二次会议在工作前一天召开。EDF也曾经尝试在其某些机组的换料停运检修期间,使用一个专职的反应堆厂房协调人,他是所有所遇到问题(包括缺电、电梯的问题、

关于许可的问题等)的中心接触点(central contact point)。

美国：“促成(Make-it-happen)”经理

美国核电厂通常使用“促成”经理来确保对关键路径工作的连续监测和现场指挥。当这些经理被指派负责某项(或某些)特定的工作时,他们确保在任务执行期间所遇到的障碍得到克服。这些障碍可能包括如下的问题:物资支持(如脚手架、保温或屏蔽组件、回转式吊车使用的缺乏、检修和电气组件等)的缺少;在工作过程中所遇到的程序问题;在检修活动中发现的非计划突发工作(如阀门破、漏,泵故障等)。在任何情况下,“促成”经理都有责任进行协调,对多工种进行考虑,从而解决这些问题,使得工作不会受到不良影响,包括时间、代价或剂量。

在 BWR,高达 65% 的总停运检修剂量都来自于干井(drywell)中的工作活动。在美国,对于干井工作协调者和经理们(其唯一的职责就是工作流程控制和监测)都减少了其在关键电厂部位的工作时间和剂量。

辐射防护工作人员

尽管辐射防护人员的特定角色以及分配给工人的辐射防护职责的大小在不同的国家变化很大,但辐射防护人员的关键作用就是为工人提供辐射防护方面的帮助和建议。因此,工人们必须能够认可跟踪其工作的 RP 技术人员。如果工人们从 RP 组那儿获得了一个辐射工作的许可,则这种认可将当然地建立起来。指派一个特定的 RP 技术人员专门监督某种类型的工作,也是可能的。RP 工作人员还有一个关键的职责,就是要为电厂管理提供及时和有效的信息,从而使管理者在确保剂量满足 ALARA 准则以及确保放射性材料受控得当方面,能够积极地履行自己的职责。

为确保常规辐射防护检查的执行,特别是在将改变(modify)放射性环境的工作期间,工作程序中必须包括“辐射防护控制点(hold points)”。设置这些点的目的就是“强迫”工人们在该点停下工作,直至放射性条件得到 RP 技术人员的检查,或者特别辐射防护措施(如屏蔽的安装、剂量率和污染区图的更新等)的实施得到确认。在很多电厂,如果现场发现以下情况,辐射防护经理或代表应当有权停止工作活动:

- 辐射状态的变化;
- 临时屏蔽未经许可被移走;
- 由于计划不充分导致的非生产性工作活动。

7.3 进入(access)控制系统

辐射工作许可(证)和控制区

在准备期间(见 5.4 节)制作的辐射工作许可证(RWP)应当由 RP 工作人员颁发给工人们。由于该许可证通常包括对剂量和放射性条件(剂量率、污染水平等)的预测,因此当实际的电厂状态与计划的状态不一致时,许可证应当修改。RWP 可以包括合适的“停工准则”(如工作期间放射性条件发生变化或者发生重大事件),当满足此类准则时,就强迫工人们联系 RP 工作人员。在电子剂量仪系统和 RWP 标识(identifier)之间最好能建立联系,以便能够直接收集与 RWP 批准的工作有关的个人剂量和集体照射。

对于控制区(特别是工人受照区域)进入和停留时间的控制,对于降低剂量是非常重要的。在控制区入口处可以采用 RWP 进行一种“电子”控制,只有当 RWP 所计划的这一天,才允许工人进入控制区。不过,有时该系统对于控制进入可能并不足够,例如,当所分配的(工作)时间特别长的时候。因此,指派一个人专门负

责进入控制是很有用的。

电子剂量测量系统(Electronic dosimetry systems)

电子和袖珍式(pocket)报警剂量仪配合实时的剂量仪硬件、软件系统,可以对工作进行实时的剂量监测和跟踪。这些系统能给出剂量率、总的剂量和停留时间报警水平,并具有很高的数据完整性和可恢复性(即数据可以在剂量仪损坏后恢复)。为了防止非计划的高剂量照射,对个人剂量进行限制、并在放射性控制区(RCA)的出入口对工人剂量进行检查是很有用的(措施)。当工人离开控制区并在实时剂量测量读数台(dosimetry reader stations)签出时,对其剂量自动更新可以消除误差,这些误差来源于自读式(self-reading)剂量仪或袖珍电离室(pocket ion chamber)的读数模拟刻度(reading analogue scale),或者来源于RWP剂量数据的数据录入误差(data entry errors)。这样,在电子剂量仪和正式的剂量记录(通常是TLD或胶片式剂量仪(film badges),之间就可以建立良好的相关性。有些电厂目前正在持续实施辐射监测计划的改进,从而采用电子剂量仪进行剂量记录。

电子剂量测量报警既可以剂量率形式设定,也可设定为个人剂量形式。通常,当工人进入任务程序(task code)后,报警阈值也立即设定了。该阈值应当足够低,以防止意想不到(incidental)的照射,同时也应当足够高,从而保证在特定的辐射环境下执行任务。工人们应当接受培训,这样当报警发生时,知道应采取何种行动(保护措施、撤至低辐射水平区域、请求RP帮助等)。应当注意的是,剂量仪应正确佩戴,即应佩戴在衣服外面,这样报警可见、可听。

电子剂量测量系统结合一套电子进入控制系统,可以提供一种进入RCA或局部工作位置的进入控制形式,确保辐射防护教育、培训、呼吸器鉴定的有效性,同时也为每个工人提供分钟级的累计剂量。与一套RWP系统一起,进入控制系统还可以防止未

授权的工作人员进入控制区。对隔离区(即换料平台 i. e. refueling floor)的局部限制,也可以这样做。这些系统对于与剂量记录和跟踪相关的任务/区域,也是有用的。

高辐射区控制

对于进入高辐射区的控制,必须制定明确的规定。通常,这些区域的闸门由不同的钥匙锁住,这些钥匙分属于不同的工作组主管(RP 主管、运行主管、电厂领导等)。要进入这些区域,工人们必须得到所有这些主管们的同意,同时,需要开一个任务前准备会,在准备会上,对该区域工作的特定风险、必要的防护规定以及任何对其安全和辐射防护有用的信息进行说明。

比利时:刷卡进出系统(Badge in and out systems)(Doel 核电厂)

在 Doel 核电厂,“刷卡进出系统”用在控制区入口处,也用在反应堆厂房的各层,或者用于某些特定的任务(蒸汽发生器、主泵等)。

比利时、瑞士、斯洛文尼亚、英国:电子剂量仪上的报警水平

在比利时的 Doel 核电厂,控制区各入口处的电子剂量仪的标准报警阈值设置为 0.25 mSv 和 1 mSv/h。对于特定的任务,这些报警阈值可以修改。此时,就建立了(activated)一个子控制区(sub-controlled area)。

在斯洛文尼亚的 Krško 核电厂,电子剂量仪数据库与电厂的个人数据库以及辐射工作许可数据库相连接。对于批准计划以外的更多辐射工作许可,报警水平也得到控制。

在瑞典的 Ringhals 核电厂,在各个入口处的电子剂量仪标准报警水平设置为 1 mSv,该水平在适当的时候可由 RP 人员修改。例如,在剂量率比较高的情况下,经任务主管同意,报警水平可以设置为一个较高的值。报警水平还可以设置为剂量率。在 Forsmark 核电厂,在各个入口处的电子剂量

仪标准报警水平设置为 0.5 mSv。RP 主管可以修改该水平。另外一个标准报警水平为 10 mSv/h 的剂量率。此外,还有一种 18 mSv 的年报警水平,该水平通过局部剂量记录数据库(LDIS, local dose register database)进行管理。在需要的时候,RP 人员还可以设置其他的报警水平或行动水平。对于孕妇,执行特殊的剂量限值,在怀孕期间,胎儿所接受的剂量不得超过 1 mSv。在怀孕的情况下,孕妇有权被安排到非控制区工作;但如果她想继续在 RCA 中工作,其在各入口处的报警限值通常设置为 0.1 mSv。该限值通过 LDIS 来管理,通常由妇女本人、RP 主管以及该妇女的工作主管讨论来决定。

在英国,尽管电子剂量仪的剂量和剂量率报警水平在 RWP 上指定,但实际上规划该报警水平的是进入 EPD 进入控制终端上任务程序(task code)的工人。对于大多数、低风险的活动,典型的报警阈值为 200 μ Sv 和 500 μ Sv/h;而对于特殊的、高风险的任务(如阀门检修),该阈值为 5 mSv/h。

法国:EDF 红区进入程序(red zone access procedure)

红区为高辐射区域,由两把锁锁住。一把钥匙在辐射防护部门,另一把则由领导部门(Direction)掌管。两把钥匙都保存在限制打开的柜子里。进入红区必须由电厂的辐射防护领导在任务前会议后授权。任务前会议的参加者包括工人、领班、风险预防部门(Risk Prevention Service)的成员和运行主管(Operating chief),会议内容包括:

- 不同干预(intervention)任务/步骤(steps)的检查以及执行这些工作的工人确认;
- 对风险的评价(review)以及不利方案(unfavorable scenarios)的检查;

- 对每个工人所配备的剂量仪的确认；
- 允许进行干预的电厂运行状态的确认；
- 由工人管理方(worker's management)、风险预防部门、运行主管以及领导会签表格,来确认工人名册、其配备的剂量仪、干预区域、活动时间段。

德国:官方电子个人剂量仪应用的概念(Concept for the use of official electronic personal dosimeter)

由于可以得到直接的剂量信息反馈,电子个人剂量仪(electronic personal dosimeter, EPD)可用于进行良好的照射控制,并建立良好的辐射防护文化。目前德国的 EPD 使用还局限在运行剂量测定方面。通常,EPD 用作官方非能动剂量仪的补充,用于大型核装置和核设施(如核电厂)、核燃料循环设施、大型研究中心以及大型医院。

在德国,对于需要测量有效剂量、从剂量仪上读出测量数据、将数据传送至有能力的机构进行评价、从测量数据推出有效剂量的那些部件的全部组合,非常强调应用官方剂量仪系统的概念,该概念与进入控制概念一起(the pool concept with access control),有望成为用于核电厂典型概念。

德国:门监测仪(Philippsburg 核电厂)

Philippsburg 核电厂在辐射防护区域的出口处使用了门监测仪(搜身仪 friskers),它们可以测量同时存在的 β 和 γ 污染。包括手、头、脚的总体表(total body surface),由 14 个 β 流气正比计数器进行测量。紧挨在 β 计数器之后,另外有两个大型 γ 塑料闪烁体探测器(gamma plastic-scintillation detectors)布置在胸部位置(左右两侧)。由于它们仅对 γ 辐射敏感,因此它们能够探测到可能存在的混合 γ 放射性

(incorporated gamma activity)。在 10 s 的测量时间里,探测限大约为 1 000 Bq(对照 Co-60, 3σ 误差)。这样,如果工人存在某些内污染,则可立即送检全身计数,剂量评价会准确得多。

罗马尼亚:对于考虑特殊任务和进入控制剂量的个人报警剂量仪

在 Cernavoda 核电厂 1 号机组,所设计的进入控制系统用来防止任何无意的/未授权的进入某些区域,这些区域存在或可能存在高放射性危害。在“控制”区里,需要采取特别的防护措施,以控制正常照射,防止污染扩散,防止或消除潜在照射,其设置如下:

- 3 区:无放射源,无可探测到的污染,剂量率小于 0.000 5 mSv/h;
- 2 区:无放射源,尽管无污染,但可能会由于工作人员和设备的移动造成(污染),无放射性系统,剂量率低于 0.01 mSv/h,制定程序控制从其他放射性区域进入;
- 1 区:含有放射性系统和设备,为潜在的污染源和/或显著的照射源,频繁进入的区域不得含有散在的污染(loose contamination)。

对于进入某个房间或明确划定为总辐射危害超过 0.01 mSv/h 的区域,每个进入点都设置了清晰的标识,标识上有辐射警告的符号和“辐射”字样。对于进入某个房间或明确划定为总辐射危害超过 1 mSv/h 的区域,每个进入点都标识了“辐射限制(radiation restriction)”字样。对于散在污染水平可能超过本底值、但通常可以进入的区域,其入口标识为“Rubber area”。

瑞典:液滴分离器(moist separator)改进的剂量预测和检查点

在 Forsmark 核电厂 2 号机组的 2003 年停运检修期间,计划对液滴分离器(压力容器的一个内部部件)进行改进。早期的剂量预测表明总的集体剂量为 250 人·mSv,有些人的个人剂量接近 20 mSv。Forsmark 负责批准所有反应堆上安全相关工作的安全委员会要求设置一组检查点。在这些检查点上,机组经理(Unit Manager)和辐射防护经理(RP Manager)应当参与对工作的审查和评价(review 和 evaluate)。建立的检查点包括:

- 确认合同商工作方法和工具的工厂验收试验(factory acceptance test):检查所需的劳动时间;
- 压力容器封头吊走:检查源项的准确性;
- 屏蔽钢板的随后安装(following installation of shielding steel plates):检查针对对象的实际剂量率;
- 工作进行中:连续检查集体剂量和个人剂量。剂量约束值为最大集体剂量 350 人·mSv,最大个人剂量为 12 mSv。

与合同商一起持续的计划(工作),使得在放射性安全方面得到了重大提高。工作计划在每个检查点都进行了审查和改进。实际工作按照改进后的计划进行,避免了任何混乱(complication)、偶然事件或事故的发生。每天要举行合同商、运行人员和辐射防护人员的会议。在这些会议上,所发生的剂量都得到了精确的监测,并通报给所有相关方(communicate to all involved)。最终的集体剂量为 165.5 人·mSv,最大个人剂量为 10.3 mSv(焊工)。高度职业化的、积极投入的合同商在早期的介入,极大地提升了工作效果(output)。



采用了防护措施的工作区

7.4 远程监测系统

预设报警水平(如剂量、剂量率或气载放射性活度)的远程监测系统(RMS)可以提供一个可靠的实时监测手段,用来监测工人受照的放射性环境。辐射防护控制室可以收集各类工作区的放射性条件信息,同时给出声音和视觉上的反馈(voice and visual feedback),这样可以使辐射区域的 RP 技术人员最少,从而也降低了此类人员的剂量。同样的方法也可以用于从辐射区域以外的某个地方来测量其他的关键参数(即自动焊、切割和在役检查的测量)。在几个国家多年所开展的远程监测技术研究和基准建立表明,该技术对于提高工人的安全 and 生产率来讲是有效的。

RMS 成功运用的一个关键因素是安全壳贯穿件可作为电缆通道(availability of containment penetration for cable access)。由于这是一个花费高的过程,因此,除设备供电所需足够的电气连接件(辅助电源/插头)外,在设计阶段(见第 9 章),考虑到这一

点是非常重要的。在辅助厂房中安装光纤通信网络对于耐用的RMS也是有益的。

加拿大: 远程剂量测量 (Teledosimetry) (安大略发电站, Ontario Power Generation)

工作人员辐射剂量的远程或无线监测技术在当今的 I 类和 II 类核设施中是一种利用程度低的资源 (under-utilised asset)。在该领域, 当前仍然处于发展当中, 不断有新的用户加入进来。Ontario 发电站的核设施自从其早期即开始采用该项技术。OPG 现在采用 IP 光纤技术来传递数据、声音和视频信号。这些发展减少了计划时间 (a reduction in setup time), 也降低生产和维护的人员剂量代价。

韩国: 辐射工作管理的 CCTV 系统 (Yonggwang 核电厂)

在 Yonggwang (灵光) 核电厂 5、6 号机组引进的 CCTV 系统由 LAN 进行连接, 可以对工作场所进行实时监测。该系统具有固定和移动的照相机。在移出隔热套管 (T/S, Thermal Sleeves) 的工作中, 在工作期间大约有 15 人通过 CCTV 来监督该工作。工作时间得到优化, 从而使照射降低了 16% (25.6 人·mSv), 同时还减少了放射性废物。CCTV 系统达到了事半功倍的效果 (make a large effect with minimum effort)。

罗马尼亚: 远程监测系统 (Cernavoda 核电厂)

在 Cernavoda 核电厂的 2 号机组, RMS 由一个计算机局域网 (local area network) 以及连接设备和计算机的一些网络分支组成。RMS 和以下系统具有接口: 固定式 γ 区域监测、固定式污染监测、袖珍辐射监测、固定式空气中氡的监测、液态流出物监测、气态流出物监测以及事故后空气取样等。功能包括:

- 监测:测量电厂正常运行时产生的辐射危害,并在辐射控制服务(radiation control service, RCS)间和主控室(MCR)中显示高危险水平;跟踪测量回路的工作状态;
- 控制:对于通道的自动运行建立结构参数(set-up parameters);对于非常规测量/标定,手动运行测量回路;配置网络数据库;
- 可维修性:在 RCS 和 MCR 房间显示设备和系统的失效情况;
- 数据存储:维护完整的短期和长期数据库;
- 操纵员接口:提供定制报告(customer reports),详细显示历史事件,对于场所辐射监测设备的远程交互控制功能(包括命令和反应的显示)。

美国:远程监测

美国电厂在实施了远程监测之后,将停运期间 RP 部门的剂量降低了一半。由于有一名技术人员在中心远程监测控制台能够监测和控制多个任务,因此只需派很少的技术人员前往工作区域。例如,在 Calvert Cliffs,在 1999 至 2006 年之间,停运期间 RP 合同商的数目以及 RP 长期工人(permanent worker)的数目减少了近 30%。在同一时间段,总的离线集体照射降低了 55%。

7.5 污染控制

对气载放射性污染应该使用合适的监测系统与控制。应特别注意这些系统的位置以及避免误报警,误报警可能是污染报警值设置得太低或者是监测系统放置的位置不合适造成的。

在报警发生时执行的专门紧急撤离程序必须提前计划并被工人熟知。如果有一名负责协助和管理撤离的反应堆厂房调度者在场,则可以使该程序容易实施。

德国:覆盖反应堆水池以防止气载放射性

德国的一些 PWRs (Philippsburg, Neckarwestheim, Isar)在停运检修期间、反应堆水池重新充水之前,使用气球丝绸盖(balloon silk)覆盖在反应堆水池上。两个移动式的通风过滤扇能捕获气球丝绸盖以外的任何气溶胶,并将它们移送至反应堆厂房的通风系统。这种方法的好处为:

- 没有气载放射性释放到安全壳中,且没有对反应堆厂房造成次生污染;
- 反应堆厂房不需要进行大量的去污工作;
- 不必要求工人携带额外的衣服或呼吸设备;
- 不需要限制安全壳内人数,因为在重新充水期间人员闸门保持打开状态;
- 在停运检修关键途径上,再充水时间(8到10小时)可以降低50%到70%。



罗马尼亚:空气中氙的监测系统(Cernavoda 核电厂)

氙化水蒸气会造成健康危害,CANDU 核电厂氙的早期检测很重要,因为它在大气中具有水蒸气的全部特性。监测系统显示通常由重水泄漏造成的氙水平,进而降低造成健康危害的可能。系统执行如下的功能:

- 对 H-3 危害预计较高反应堆厂房和服务厂房中各个位置处的空气进行连续采样;
- 对连续采集样品的 H-3 浓度进行测量,并将测量结果与操纵员给出的一个预置值(整定值)进行比较;
- 显示氙的放射性浓度(Bq/m^3)或根据要求显示当量剂量率(Sv/h);
- 当超过整定值时或发生故障时,在整个 RMS 网络中远程发出声光报警;
- 使用临时取样管线和半便携式氙监测仪进行“非例行”的氙浓度测量;
- 氙监测仪应当满足以下性能要求:
 - 测量氙氧化物,同时为其他放射性核素提供补偿,包括所有的反应堆气体和氙;
 - 在剂量率水平高于可调整定值时或在设备故障时能够报警。

瑞典:外部污染物的监测(Forsmark 核电厂)

在 Forsmark 核电厂,为控制污染采取了如下的程序:

通过监测仪(walk-through monitor):基于报警的行动
(Actions upon an alarm)

- 洗手,更换包裹严密并具有保护作用的鞋子,再一次通过监测仪;
- 如果监测仪仍然报警,与 RP 小组联系。

前监测仪(pre-monitor):基于报警的行动(Actions upon an alarm)

- RP 工作人员调查并记录人员的工作地点和工作对象;
- 洗手,更换包裹严密并具有保护作用的鞋子,再一次通过监测仪;
- RP 工作人员执行手动监测并决定下一步的行动。

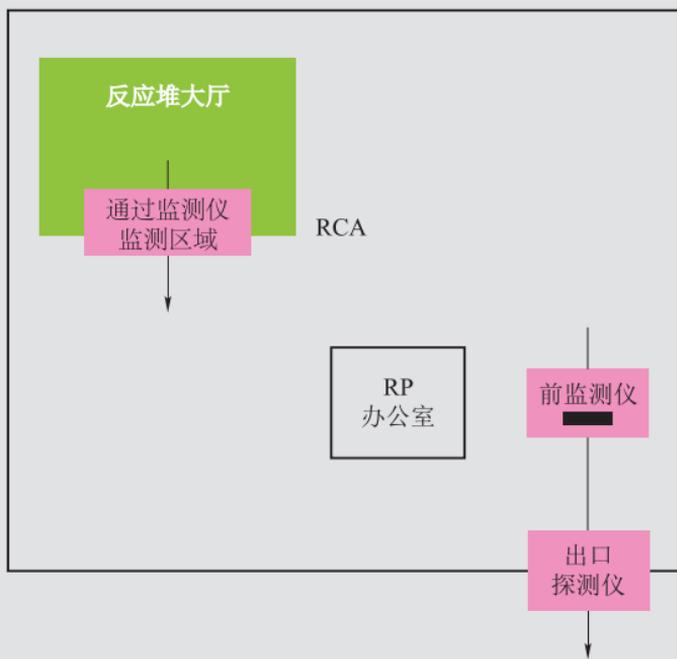
出口监测仪(Exit monitor):基于报警的行动(Actions upon an alarm)

- 应当联系 RP 小组;
- 报警信号也传入 RP 办公室(晚上送到保安中心),并显示监测区域的视频信息;
- RP 工作人员到达监测区域并决定下一步的行动。

尽管这些程序是在几年前执行的,Forsmark 已经可以获得如下信息:

- 更快和更准确地对区域的污染扩散或与特定工作相关的污染扩散作出反应,包括针对清洗和保护设备采取对应措施。这也防止了内部污染的发生;
- 在该电厂的 ALARA 目标中给出了报警数量,占出口监测仪测量总数的比例从 2% 减少到 0.5%;
- 让工作人员更加相信,他们在 RCA 中的安全和工作环境是得到监控的;

提高 RP 人员关于污染事件通常怎样发生和在哪里发生方面的知识水平。同时,污染事件都进行了认真的记录。



7.6 不必要剂量的避免和通行照射的降低

通行剂量指工人前往工作区域的途中受到的剂量。为降低此剂量,需要向工人提供与工作区域相关的所有必要信息。在反应堆厂房入口、在厂房内各场所、在工作规程中以及在任务前准备会期间提供详细的位置图能帮助缩短工作人员的通行时间,从而通过准确确定工作位置并提供最佳路线而减少了不必要的剂量。这特别适用于对小阀门的工作,通常这些小阀门很难找到。剂量率的相关信息也很重要,尤其是在通行路线上存在热点的情况下。

用于指示热点和低辐射区域的清楚标识对于降低剂量很重要,例如包括如下标识:

- 闪光热点标识或围带(电池供电的,带无源红外线传感器

的 LED)；

- 能发出预录警告信息的运动感应声音提示；
- 帮助来自其他国家工作队/承包人的多语提示；
- 亮绿色的低辐射区域的防水帆布。

采用先进的成像工具,能让工作人员在感兴趣的区域进行一次虚拟旅行,对于工人定位和熟悉工作现场也非常有用,而且没有任何剂量代价。

为了缩短在高剂量率区域花费的时间,识别低剂量率区域是很有用的,这样工人就能在较低的辐照下阅读其工作程序、准备工作,或等待其在工作程序中工段。该方法的一个实例是在低辐射区域设置工作桌椅。

最后,需要注意的是,操作剂量率控制对于避免不必要的剂量也是很重要的。这只能通过有效的沟通和工作协调来完成。例如,对管道系统中热点的“瞬时”高剂量率进行有效控制,需要先识别热点(由工人和/或 RP 人员识别),然后冲洗管道或屏蔽热点。如果这些热点从特性上来讲是瞬时的,则跟踪调查也很有必要。

芬兰:休息室

为了将花在工间休息的时间缩至最短,芬兰的核电厂布置了休息室,工人休息时不必换下控制区防护服。休息室位于监测检查点(工人进入休息室之前,必须通过入口监测仪并满足 4 Bq/cm (此处可能为 cm^2)的污染水平)和通往更衣间的“脚踏垫”(step-off pad)之间。休息室内也有卫生间。通过这个方法,在“工间休息”上所花的时间从近 50 分钟缩短到 20 分钟以下。

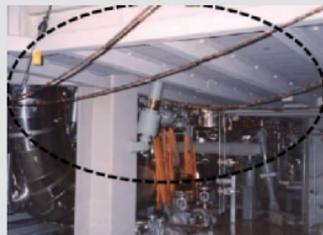
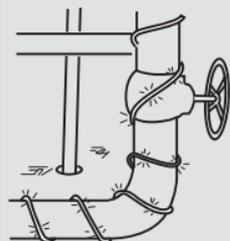
法国:避免不必要的剂量

在 EDF,当执行 γ 探伤检查时,应用了一个专门的程序:定义一个“隔离”区域(试验期间不允许工人进入该区域),并且在反应堆厂房各处张贴的厂房总图中都标出该区域。在进入该区域的所有入口处都贴有特定的标识,来指示因高辐射风险和射线照相控制而禁止进入该入口。

EDF 在反应堆厂房环廊的几个楼层都确定了“绿(ALARA)区”。这些区域显示清晰。例如,这些区域经常正好建在反应堆厂房工作人员入口闸门外。为了确保工人在必要时经常使用、而不是过多地使用这些区域(它们并不是休息区),训练工人使用这些区域当然也很重要。

日本:可视提醒物的使用

在日本,使用可视提醒物来告知工人高或低的辐射剂量。日本的 BWRs 引入了彩色发光管来指示高辐射区域(红色)和低辐射区域(绿色)。这些发光管由柔韧的、透明的聚乙烯制成,每 30 cm 间隔有一个彩色灯泡,可以悬挂在设备、栏杆和墙壁等上,以指示区域是避免进入的还是作为等待区域使用的。它们可以与区域辐射监测仪连接,并根据剂量率改变颜色。下图显示了这些发光管的使用情况。



另外,九州电力有限公司(Kyushu Electric Power Co. Inc.)使用以下的标识来引起工人对高辐射区域的注意,并且提供等待场所的信息:

- 红色(≥ 0.5 mSv/h):注意辐射! 禁止靠近! 禁止停留!
- 黄色(< 0.5 mSv/h):注意辐射! 禁止停留!
- 绿十字:等待场所(与一块绿色聚乙烯板一起使用)。

[放射線注意(赤)]



0.5 mSv.g以上

[放射線注意(黄)]



0.5 mSv.g未滿

[待機場所]

緑色のポリシート
と合わせて使用

瑞士:避免不必要的剂量(Beznau 核电厂)

在 Beznau 核电厂,当同一房间或不同房间之间分类的等级改变时,用标识指示各区分类的等级以及实测剂量率(环境剂量、接触剂量,1 m 处剂量等)。此外,在控制区入口处的保健物理办公室,备有指示反应堆厂房和核辅厂房内各点处环境剂量率的分布图,根据机组是处于运行还是停机状态而不同。在控制区的其他部位也可见到这些指示图。在控制区里,特别是在反应堆厂房里,很多地方还有“RP 岛(RP islands)”。这些分区的剂量率非常低,在工人工作期间可作为撤退区(fallback zones)使用。

英国:部件位置图(Sizewell B 核电厂)

在 Sizewell 核电厂,反应堆厂房入口处显示有“部件位置图”。所有中高辐射区域的房间都备有“辐射等值线图”。这些图上包括房间的布置、阀门的位置等,以及相对高和低风险分区的位置。另外,工作中高辐射区域的所有阀门、焊

缝和缓冲器(snubbers)上都制作“保健物理信息单”。这些信息单包括部件的照片、放射性条件的概述、接近这个部件的路线和对这个部件进行工作而制定进度的最佳时间。信息单背面是显示部件位置的位置图,以及附近的热点和低辐射区。主要回路和阀门图都贴在各高剂量率区域入口的墙上。这些所谓的剂量率等值线图显示出高和低剂量率区。信息单由保健物理部门制作,包括许多核电厂部件的照片、位置图和辐射剂量率信息。工人也能通过一个 Surrogate-Tour[®]软件了解他们的工作区域。

由于气闸的容量通常限制了进入安全壳的人数,反应堆厂房进入控制日渐重要。Sizewell B 采用了一个限额系统,并由保安强制执行,然而,由于承担保卫职责的工作人员通常是短期合同工,对工作计划知之甚少,该系统并不是很有效率和有效果。实际可行的是,核电厂应当使用安全或剂量测量进入控制系统来控制安全壳内的人数。

7.7 避免返工

返工的需求可能是由设计、建筑、计划和执行不好导致的。作为良好工作管理的一部分,应当记住的是,一项工作做得快但不好可能意味着重做或者做更多的工作去纠正问题。

这可能要求不仅仅简单地重复相同的工作,而可能要求纠正所有的次生影响(例如,曾经在管道中遗忘了一颗螺丝钉,后来这个螺丝钉损坏了蒸汽发生器传热管,将这个螺丝钉移除所付出的金钱和剂量代价等)。如果在返工开始前反应堆必须冷却降压,且在返工后需要再提高温度和压力,因返工延迟的时间可能是几天。这个延迟也将造成来自于其他工作的“次生”剂量。此类工

作,包括诸如每次启堆都必须重复的核电厂的运行,以及因额外需要时间造成进度减慢的任何工作。从 ALARA 的角度来看,应该识别停运检修期间的所有返工,预测其所造成的个人剂量和集体剂量后果,并了解它们的成因以避免其再发生。

公司应该利用 ISOE 中的信息研究姊妹核电厂返工的经验,以获得避免返工的思想。

7.8 废物管理

废物管理是所有阶段(建造、工作计划和工作执行)工作管理的一个重要部分。为了避免不必要的剂量,在工作计划和工作执行中对诸如后勤(logistics)(废物应该尽可能快的运出工作区域)、废物在离源尽可能近的地方分选、中间储存的需求和最终处置的方法这些方面进行考虑很重要。优化过程要包含这样的目标,即使尽可能多的废物被清洁和处理成非放射性的废物。

瑞典:RCA 中的放射性废物分选站(Formark 核电厂)

为了通过放射性废物最小化来降低剂量、花费和环境负担,Formark 核电厂引进了一个系统,在 RCAs 中源位置处对废物进行分选。在核电厂的几个位置,建立了几个废物分选站,在那里,工人能容易地对工作产生的废物进行区分。通过对废物进行分选,把不需要作为放射性废物的物质从放射性污染的物质中区分开来。分选站有约 10 个不同的隔间,工人可以根据规定的和显示(displayed)的类别将废物放入隔间。在分选站,工人将废物区分为诸如以下的类别:

- 最大剂量率 <0.3 mSv/h 的固体废物;
- 剂量率 <0.3 mSv/h 的软废物(如,薄纸、塑料物品、纺织品);

- 认为没有被污染的物质,这些物质被 RP 技术人员检查后能作为没有放射性限制的“常规”废物进行清洁和处置;
- 低污染或无污染房间产生的物质;
- 电子类的废物、电池、电灯泡和荧光灯、化学品和喷淋罐,都有单独的容器储存。

来自于低污染房间的废物通常会达到清洁水平,即使这些废物是在 RCA 里产生的。其他物质可以在储存场的浅地面埋掩 (shallow land burial) 进行处置,而不用将其放在 SFR-1 地下贮存场的岩洞罐 (rock caverns) 中。

7.9 工作执行期间经验反馈的收集

工作执行期间,反馈数据的收集对于反映正在进行的工作情况非常重要。在剂量异常时 (in case of dosimetric “drift”) 实时反馈可以持续地进行剂量评估、工作优化和迅速采取纠正行动。剂量测定的结果应该在明显的地方指示,例如,在反应堆厂房入口或在更衣室内。在停运检修期间,提供实际和预测集体剂量变化的比较,能鼓励工人参与到电厂全面的 ALARA 努力中去。关键信息 (的提供) 能激励工人努力达到停运检修目标。例如,在法国和英国,一些核电厂已经进行了每天指示停运检修时实际和预期的集体剂量的变化这方面的试验,并且得到了工人的认可。第 9 章对工作反馈做了更完整的论述。

日本:人员资格和照射监测系统

日本所有的核电厂都有人员照射监测系统,它能使核电厂:

- 在控制区入口确认工人的信息(身份、目前的年照射、培训和医学检查史);
- 用电子剂量仪监测每次进入的个人照射量,并与剂量限值比较;
- 收集在控制区的个人照射量和花费时间;
- 按个人、工作编码或工作小组分类对照射量进行分类。

罗马尼亚:DOSECORD 系统(Cernavoda 核电厂)

规章制度要求记录和存储工人剂量。辐射防护部门对进入控制区的所有人(员工、短期工人、承包人和访问者)进行个人(外照射和内照射)剂量监督。为了校正和完善以电子和纸质形式的剂量记录,并保存所有的分析结果和个人身份,通过一个名为“DOSECORDS”的数据库执行剂量管理。每个员工、保健物理人员和管理者都能存取剂量信息和编写报告。

瑞士:PERDOS 软件

在 Beznau 核电厂的 PERDOS (personnel dose data collection, monitoring, and reporting software 个人剂量数据收集、监测和报告软件)系统中,将电子剂量仪连接到核电厂的计算机系统,几乎可以实时监测到个人剂量。该系统尤其用于:

- 监测每个工人(NOK 人员和外部承包人)每年(从 1989 年开始)、每月、每天或每项工作(可以得到在这个区域出现的日期、时刻和持续时间)的剂量;

- 确定工人的最大受照剂量率；
- 将表单按工人组别、受照剂量水平进行分类；
- 将一些特殊的数据直接传送给安全和辐射防护主管部门；
- 比较停运检修期间的预计和实际集体剂量等。

英国:Sizewell B 工程计算机系统(ECOS)

Sizewell B 核电站正使用一个强大的工具监测核电厂——工程计算机系统(ECOS)——供运行保健物理学家使用。ECOS 每 2 秒记录一次核电厂周围近 20 000 个不同的传感器上的读数。保健物理学家最感兴趣的是区域 γ 辐射监测值、安全壳的活度水平、烟囱的活度水平以及 HVAC 管道的活度水平。系统的温度、压力、水箱和地坑水、阀门的位置和泵的运转状态等信息也可得到。所有的这些数据都是动态的,也可以在历史回顾时检索。

7.10 小结

优质工作的执行是有效工作计划和准备的目标,也是影响与某个特定任务相关的花费、时间和剂量的良机。工作管理的原则,如果在这个阶段应用,能有助于对工作的这三个方面进行优化。应用工作过程控制、给工人提供合适的信息,收集反馈信息,激励工人,是有效工作管理采用多种方式优化工作的所有方面。

8 工作评价和反馈

工作管理的策略就是一个连续的循环,包括制订进度、计划、执行、评估、跟踪、根据每个经验教训进行改正以及对下一项工作重复该过程,从而使得工作循环不断优化并且符合现在的技术发展。“评价和反馈”既是工作的最后阶段,同时也是下一个工作重复循环的第一个阶段。

8.1 简介

一般情况下,为了给工作执行提供完善的反馈,需要两种级别的信息:“内部”级别,包括核电厂内部执行情况的分析;“外部”级别:提供国内和/或国际的信息,关注新理念的交流,让核电厂评估自己与其他同类型核电厂相比处于何种地位。

各种信息资源可用于进行工作的剂量评价,例如核电厂内的辐射照射监测系统数据库或纠正行动程序,以及公司范围、工业范围和国际范围的 ALARA 实践数据库。工作审查和适当跟踪包含在任何任务进程的最重要内容中。世界上最大核电厂职业照射数据库——ISOE 数据库,为基准分析和照射趋势提供了一个重要的全球性的信息资源。

通常,跟踪将直接导致在考虑操作的下一个照射执行。对于经验教训,不仅包括良好实践,还包括改进的领域,都应勤于收集,并且不仅应与工作组进行交流,还应与电厂内、工业界和国际范围内的同行进行交流。RP 经理应该识别所有可利用的信息资源并有效地使用这些信息资源,同时分享他们自己的信息和经

验。最后,工作管理应进行定期的审核,以确保其能正确地发挥作用。

8.2 工作审查和跟踪

由于较大工作比较小工作需要在更深的程度上进行审查,因此,某项工作后审查的范围和性质将随所审查工作的不同而不同。为指导审查者,应该建立灵活准则(例如,总集体剂量、总的人小时数、总集体剂量和/或总的人小时数高估或低估的百分比等),以帮助确定哪些工作需要审查。通常,审查应该由一个多专业的(审查)组来进行。审查的目的应该是确定工作的哪些方面执行的较好或较差,以及哪些方面在未来能执行得更好和如何执行得更好。

已开展工作的工人应直接提供其对工作的反馈,包括如何进行改进、如何更好地解决遇到的问题,这样的信息可以通过工作后的简报进行收集(附录 4)。也可以在停运检修结束时与承包人组织专门的会议,但这样可能需要支付给承包人因工作完成后仍留在现场所需的费用。

在停运检修时使用“意见表”(附录 5)也是收集反馈信息的一个好的途径,在“意见表”上,工人可以提出各种降低辐照的行动。为了鼓励工人完成这样的表格,必须将怎样分析的他们的建议以及如何考虑的他们的建议反馈给工作人员。这些表格的管理必须进行精心组织,重要的是要指定一个人(或一组人)负责收集和分析这些建议。

编制包括技术和辐射防护数据的停运检修报告是很重要的。这类报告必须包括停运检修目标偏离原因分析(从正面和反面分析)、改进的建议和“良好实践”的识别。这些报告应该在停运检修各部门内部广泛分发。

为了使工作管理循环闭合,建立一个能够确保工作反馈得到考虑的机制是必要的。为了保证合理的建议能够执行,诸如跟踪表的正式的体系或诸如简单地维持工作后审查组的完善性来准备和计划工作的非正式的体系已得到应用。不管在何种体系中,工作后审查组的意见(input)对于合理的工作跟踪是重要的。

停运检修结束后,组织一次或多次停运检修分析的多学科会议对于确定和落实需执行的跟踪行动是很有用的。这些决定可能被 ALARA 委员会(如果有的话)采纳或被一个更普遍的“停运检修分析”组采纳。无论哪种方式,这样的跟踪组都应该持续存在,在下一次停运检修到来时,其角色从停运检修跟踪转换为停运检修计划。这将有助于确保各次停运检修经验的延续性。应该注意,大多数国家都以年为循环周期(It should be noted that such year-round coverage philosophy generally exists in most countries)。

日本:RV 堆内构件的替换(Ikata 核电站)

伊方(Ikata)核电站 1 号堆在 2004 年完成了堆内部件(CI)的替换。总剂量低于预计剂量的 1/10。其主要贡献是 CI 储存容器较低的剂量当量率和所采取的各种降低辐射照射的措施,例如,工作前的仔细研究、模拟训练、临时性屏蔽——在 RV(反应堆压力容器)顶盖和堆坑内(the reactor cavity)的工作人员等待区域——给容器安装底板时远程操作和 RV 顶部剂量当量率报警指示。根据其经验,在 Ikata 核电站 2 号堆类似工作中得到了应用。主要的改进为:

- 将干燥和焊接密封容器底板的工作场所从壳内换到剂量率低的一个新维修厂房;
- 通过部分优化特定工作和使用有经验的工人来缩短工作时间。

由于 2 号堆的容器表面剂量高于 1 号堆(1 号堆: 0.6 mSv/h; 2 号堆: 0.7 mSv/h)及 2 号堆的源项也略高于 1 号堆, 2 号堆总的集体剂量略高于 1 号堆。

Ikata 核电站 1 号堆和 2 号堆 CI 更换的剂量

		实际剂量	计划剂量
总剂量(人·Sv)	1 号堆	0.14	1.8
	2 号堆	0.21	0.28
个人最大剂量(mSv)	1 号堆	4.50	20
	2 号堆	6.58	20

日本:通过计划、工作审查和跟踪(TEPCO)实现 ALARA 目标的流程

来自于所有厂址的 RP、化学和维修人员组成的剂量目标控制的同行团队(A Dose Target Control Peer Team)被组织起来改进 ALARA 大纲。传统的 ALARA 流程,通过以下(行动)进行重构:

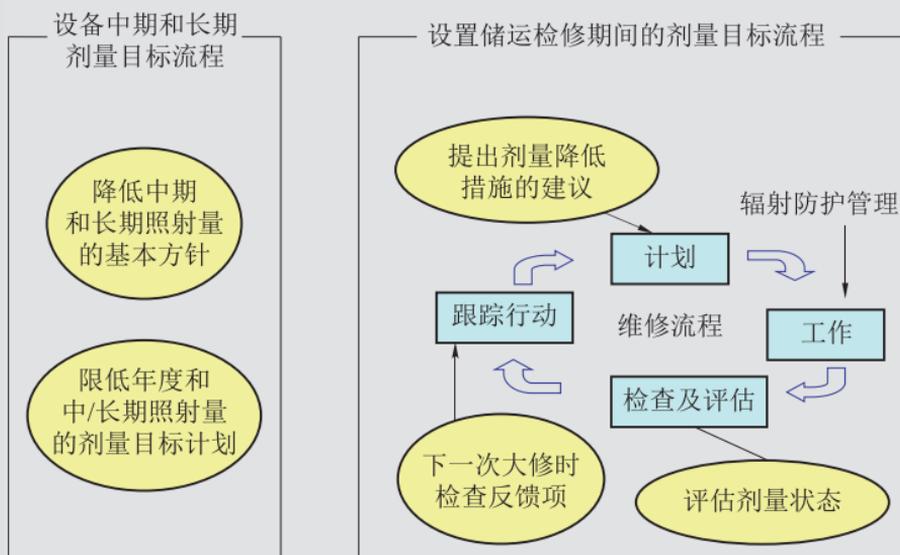
- 审查“as-is”ALARA 流程;
- 识别“as-is”和“to-be”流程的差异;
- 关注在计划和停运检修后,RP 和维修两个工作过程的接口。

目的是更有效率和有效果地将 ALARA 思想考虑到工作过程中去。团队(the team)旨在改进两个主要流程:设置中期和长期剂量目标;设置停运检修期间的剂量目标。第二个流程关注三个工作步骤:工作计划、审查和停运检修后的工作。在这些工作步骤中,RP 人员要与维修人员/承包商就以下几个方面进行沟通:

- 停运检修合同(签署)前提出的剂量降低措施;

- 详细的工作进度信息；
- 含经验教训的停运检修报告。

这个流程从 2007 年已开始执行。



罗马尼亚:停运检修报告(Cernavoda 核电厂)

在 Cernavoda 核电厂,在计划的停运检修期间的所有活动都是基于经批准的工作计划来执行的。在每项活动期间,指派一个人跟踪并记录所有的相关问题。工作结束后,要发布一份记录了存在的问题和工作是否按工作计划执行的报告。在停运检修结束时要发布一份完整的停运检修报告,报告的内容包括:

- 相关的工作人员；
- 剂量目标(估计的集体剂量)和集体受照剂量；
- 集体剂量大于或小于估计值的任务分析；
- 工作组的剂量分布；
- 所有任务的集体 γ 剂量(累积剂量和逐日剂量)；
- 摄入氡造成的集体内照射剂量。

该报告要提交给所有的电厂工作人员和主管部门。纠正/预防行动的建立均基于该报告的结论。

美国:稳压器加热器屏蔽套的替换(San Onofre 核电厂)

2004年, San Onofre 核电厂的3号堆替换了两个稳压器加热器和 Alloy 600 的屏蔽套(sleeves)。其主要问题是放射性照射和污染控制。工程控制措施包括铅屏蔽、HEPA 通风系统、真空装置、工作区限制和加屏蔽套。改进的工作实践、远程剂量测量以及在屏蔽套、波动管线和工作平台上安装临时屏蔽,比原先预计的 $816 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ ($81.6 \text{ 人} \cdot \text{Rem}$) 照射剂量降低了 $170 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ ($17 \text{ 人} \cdot \text{Rem}$)。停运检修的照射剂量为 $645 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ ($64.5 \text{ 人} \cdot \text{Rem}$);最大个人照射剂量为 16.85 mSv (1685 mRem)。从 Palo Verde 核电厂类似的工作中所得到的经验,免费共享给 San Onofre, 并为其提供了很大的帮助。

在 San Onofre 核电厂2号机组上的工作包括了所有 Alloy 690 的稳压器加热器的屏蔽套的替换。在3号机组的第一个稳压器加热器半屏蔽套修理项目和当前的2号机组管嘴替换工作之间,对工作流程进行了大量的改进。2号机组的集体剂量预计为 $390 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ ($39 \text{ 人} \cdot \text{Rem}$)。总的预期照射接近 $300 \text{ 人} \cdot \text{mSv}$ ($30 \text{ 人} \cdot \text{Rem}$),比3号机组降低50%以上。焊接承包商的工人实践显著改进。大多数焊工都参与了早期 Palo Verde 的压力容器加热器屏蔽套维修项目。使用有经验的工人显著地降低了放射性剂量。重大的成功在于供货商使用的改进工具、模拟训练、有经验的工人以及工作计划。

8.3 运行经验数据库

工作后的审查对获得工人的反馈很重要,而用于运行数据收集、储存及分析的计算机数据处理管理系统的使用,对于确保反馈有效、完整、有记录以及建立基准和进行分析可用也是很重要的。对于这类系统,内部的和外部的数据都很有用,包括与某一特定任务或一类任务相关的数据,如,工作时间、人力、设备、剂量等等。在内部水平上,可以直接收集到工作前、工作中和工作后的数据。基于计算机的系统大多可以很容易地与运行剂量测量系统关联,对于收集此类信息是非常有效的。

对于具有潜在高辐射照射工作的辐射防护行动的优化,分步预测工作时间和相关剂量是得到认可的良好实践。这类计算结果为跟踪工作进程提供了很好的工具,并且能较早地认识到可能存在的问题。为了提供工作场所(不仅仅在控制区)中的剂量、正在进行的工作的状态和时间这个目的,要求安装一个在线计算机剂量测量系统,并且应该与工作许可系统具有接口。所涉及的不同工作组(机械、电气、脚手架、保健物理、工业安全等)应该为收集所有可得到的经验提供支持,因为这些经验构成了类似任务计划的一个有价值的基础。数据必须对所有对计划和进度安排有贡献的设施开放,并且应当由所有与该工作相关的机构团体负责更新工作情况。

所有关于工作、设备和工作区域信息的适当文件都是运行数据库的必要输入,这个数据库可以在评价阶段和下一次停运检修准备中使用(第5章和第7章)。为了创建尽可能完整的运行经验数据库,收集覆盖面广的多专业数据是非常重要的,包括剂量测量数据,操作全过程的信息等。这样可以建立有效的基准,并且可以对未预见事件以及预测与记录剂量偏差进行分析。此类数

数据库可以是地方、国家和国际层次的。

对于此类数据的收集,其困难并不多见于计算机数据库管理系统的汇总,而是原始数据的直接获取。一个有效的办法是由辐射防护人员或工作领班(the job foremen)在操作结束时系统地完成的记录。相关信息包括剂量测量数据(总的集体剂量、个人剂量等)、描述工作环境的数据(环境剂量率、污染、防护衣物的类型、“工作功效因素(job ergonomics)”等)以及任一所遇故障的具体的细节、故障原因、用时间和剂量量化的影响。由于这些记录对于过去经验分析所用的最终信息的质量和准确性有影响,因此在完成这些记录时应特别注意。为使这些记录不会让负责人看起来费劲,对这些记录进行了充分地简化,因此,这些记录在设计时必须很容易导入:收集数据时按问题的时间顺序进行计划;可能时对特定的变量进行编码等。

ISOE:ISOEDAT 全球职业照射数据库

ISOE 计划的参与者有权使用世界上最大的核电厂职业照射数据库,该数据库提供了 29 个国家 470 座反应堆(正在运行和正在退役)详细的照射数据。该数据库可以通过 ISOE 网站(www.iso-network.net)或 CD-rom 获得,并且允许使用者根据各种核电厂(根据反应堆类型同类参考堆等)的年剂量、停运检修剂量、每种工作剂量对剂量结果进行校准。数据库中还包括了 RWP 人小时数和一些特殊的剂量率的信息。如果需要更多的信息,对于每个核电厂,都确定了一个联系人,从而允许参与者直接与核电厂联系。

法国:工作末期报告(End-of-job reports)

在 EDF 核电厂,承包人需要为高剂量的工作编写一份“工作末期报告”。对于 RP 部分,这些报告包括以下的信息(该报告中也包括了一个技术部分):计划照射和实际照射的

比较以及差异的解释,剂量率和污染物分布图,不良事件的识别、RP 行动,良好的实践等等。

英国:摄取所获得的经验教训(Sizewell B)

在 Sizewell 核电厂,大约每个堆停运检修一个月后,所有的保健物理(HP)参与者(来自于每个团体,包括承包人都要汇聚一起确定所获得的经验教训。作为补偿,他们可以从“获得的经验教训”数据库中获取信息,该数据库可以由想要填写数据库的任何人来填充(可获得纸质或电子的表格)。对于停运检修期间所开展的主要工作,还要编制一个专门的 HP 反馈经验报告,尤其是那些工作前 ALARP 简报中所处理的经验反馈,包括:剂量评价、剂量测量结果、个人污染事件、经验教训(有的发生,有的未发生)以及对下一次停运检修的建议。此外,还要编写一份总的“HP 停运检修报告”,对最后的停运检修和涉及辐射防护和放射性废物的情况进行总结。报告中要突出良好实践和值得提高的区域。报告要提交给检查人员(NII)、核电厂经理、FMA 和 RWE(承包商的工人小组和 HP 分包商)、英国能源 HP 总部、洗衣店等。

8.4 ALARA 实践的比较

在工作评价方面,用于评价工作的指标和判定所针对的基准必须是多方面的。例如,集体剂量和个人剂量分布必须伴随着其他指标,如个人小时数,工人数,工作持续时间,必需的返工、拖延和问题等。对于这些基准和指标,工作前后 ALARA 分析数据,历史数据以及其他核电厂的数据都是非常重要的(见 5.6 和 7.9 节)。

基于工作后审查所收集到的信息以及在运行经验数据库中所包含的信息,使得在相同 NPP 机型中比较 ALARA 实践和工作的集体剂量成为可能,有时也可以比较设计不同的核电厂的相似工作。根据姐妹组将不同的核电站设计进行分组(如 ISOE 职业照射数据库中的做法),可以建立一个共同的比较基础。ALARA 的相关参数,如源项(或初始剂量率)和核电厂的系统配置,能够帮助确定计划所需的初始条件。

在进行分析和建立基准时,应该采取一个结构化的方法。为了识别需要采取行动的最重要的区域,可以采用返工或事故原因分类的方法。对于特殊操作,“时间和动作”研究可以对执行程序中所采用的技术以及对目标区域进行评价,从而全面地提高流程效率。这些研究也可以覆盖其他领域,例如,工作站设计、改进工作方法的制定以及时间标准的建立。

对于已经执行过几次的某种操作(可能在不同的环境剂量率条件下),在对其进行剂量趋势分析是,有必要针对某个参考环境剂量率水平,对剂量进行归一。归一化可以确认每项工作所经历的真实受照时间。这里需要注意的是,此类的分析表明,当一个曾经在较高剂量率下执行过某种操作的班组,又在低环境剂量率下执行该操作,工人在这个区域花费的时间比必须花费的时间长,因为他们已经习惯了某一辐照水平,并且当剂量率没那么大时就不那么重视。这样的现实说明,在每次干预前都需要为工人提供一个考虑了实际剂量率的预测剂量。

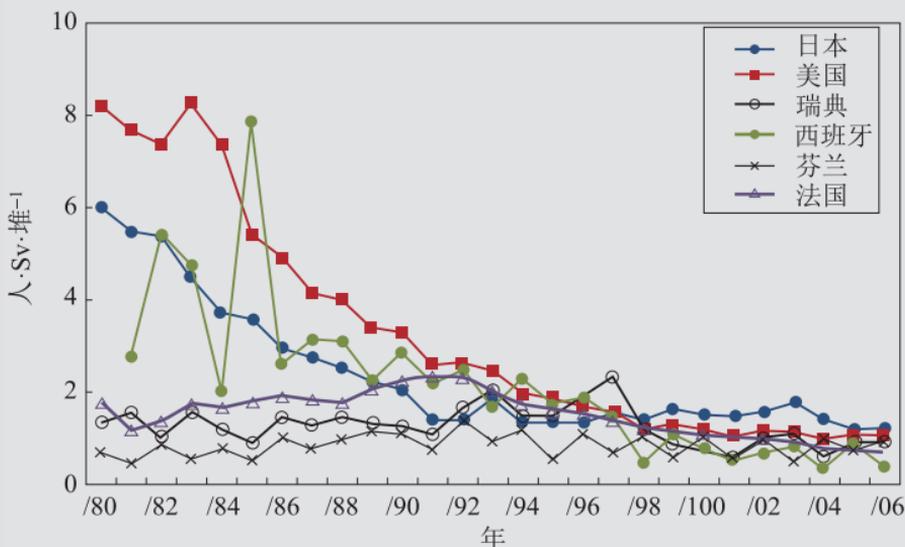
ISOE 网站也是为 ISOE 参与者提供评价的一个重要资源,可用于审查和分享主要工作(如,蒸汽发生器替换)经验,为全世界核电厂的辐射防护专业人员建立联系以讨论共同问题或组织访问(如,建立基准的访问)。年剂量或停运检修剂量分析可用于选择“最佳”核电厂进行访问,以分享实际的 RP 经验。

加拿大、罗马尼亚:CANDU 业主群

由 CANDU 业主群 (COG) 管理的健康、安全 and 环境 (HS&E) 研发项目由加拿大的 CANDU 堆业主、罗马尼亚的 SNN 和加拿大原子能有限公司提供资金。该项目关注辐射监测、辐射防护和剂量测量相关的问题,包括工人、公众和环境辐射照射风险的确定。满足 CNSC 咨询和管理文件的要求是该项目的重要推动力。

日本: ALARA 实践与 ISOE 的比较

ISOE 职业照射数据库和经验交流网络为 ALARA 实践的比较提供了一个极好的机会。使用 ISOE 数据库比较发现,从 20 世纪 90 年代早期以来,日本单堆的平均集体剂量一直没有降低,而其他国家(如,美国)则有显著的降低。



在运行反应堆的单堆平均集体剂量, 1980-2006 (ISOE, 2008)

ATC 与日本电厂合作,通过 ISOE 通信网络发送调查问卷,以了解这种现象的原因。随后,在 2005 年 ISOE 国际 ALARA 研讨会上,ATC 与 NATC 讨论了协调基准访问美国

核电厂的可行性。在 2005 和 2006 年, NATC 和美国公司合作开展了一系列的成功访问。该成果在 2007 年 ISOE 国际 ALARA 研讨会上与 ISOE 成员进行了分享。日本照射较高的原因是, 在循环周期、换料停运检修时间和维修准则方面, 日本和其他国家有所不同。日本允许的运行周期为 13 个月或更短; 核电厂的停运检修时间为 2 到 3 个月, 是其他国家核电厂的两倍。

8.5 经验反馈共享

为补充核电厂层次可得到的信息, 必须使核电厂与同一公司的其他核电厂以及国内和国际层次的其他核电厂保持联系。地区和国际用户群辐射防护会议的参与、经验交流网络、网络信息系统(如 ISOE 网站 www.isoe-network.net)以及主题研讨会(如 ISOE 国际和地区 ALARA 研讨会)促进了信息的交流, 同时让人们了解到新的技术。这些都对保持剂量 ALARA 的工作给予了极大的支持。

德国: VGB

在德国, 所有主要的德国电力公司(核电或非核电)和一些其他欧洲国家的电力公司一起建立了一个组织机构(VGB)。这个组织机构中有一个保健物理管理者的 VGB-群, 所有的德国核电厂在该群里都有代表。该群每年召开两次会议, 每次会议都位于其中一个核电厂。会议讨论的内容通常包括:

- 信息和经验交流;

- 特殊的辐射防护行动报告；
- 管理改进；
- 特性的放射性问题专题讨论,包括: β 剂量测量、照射剂量测量、ALARA 课题、ISOE。

罗马尼亚:OPEX 流程(Cernavoda NPP)

在 Cernavoda NPP,每个职工都必须报告任何发现的异常状态,包括疑似异常(near-misses)。许多职工都在 CANDU 业主群(COG)网站的“信息和交流”论坛上注册,并获知在其他核电厂所发生的外部事件。发生在其他核电厂同时有可能在 Cernavoda 发生的事件,在 Cernavoda 也作为异常状态通告,并分析这些事件发生的可能性和采取纠正行动的必要性。这些异常状态由 POEX 群进行分析并将其分为“次要、“重要”或“事件”三类。后两类的异常状态需作进一步的分析,并系统地确定其直接原因、诱因(contributors)和纠正行动。为了防止“事件”再次发生,需要一个部门协作组对其进行审查,以确定其发生的根本原因。工人们在工作前会得到内、外部所有信息的通报。纠正行动由质量管理部门进行跟踪。异常状态的统计和所执行的行动随电站/部门的业绩指标每月上报一次。

8.6 项目审核

最终,为确保工作管理体系运转正常,需要对其进行定期审核。而且,从非常正规到非常不正规的很多系统都投入使用。审核系统可以是电厂层次的内部系统,如果具有关联性,也可以是公司层次的,从而了解基于该公司的全球所有电厂的情况。内部审核项目应该包括国家法规和电厂内部制度、目标的符合性确

认。外部审核,如 IAEA 组织的 OSART(运行安全审查团队)任务或 WANO 组织的同行审查都是非常有用的,因为外部审核为被审电厂带来了来自其他电厂的专家,他们使审核具有“独立性”,并促进电厂之间信息经验的交流:

- OSART 任务仅在相关 IAEA 成员国的要求下执行,且针对运行安全的重要项目进行审核。某个任务可以根据某个核电厂的特定需求进行调整。全范围的审查将覆盖八个运行:管理、组织和行政;培训和资格认定;运行;维护;技术支持;辐射防护;化学;应急计划和准备。根据个别的需求,OSART 审查可以覆盖所有的审查主题或只针对几个特别感兴趣的方面。OSART 小组成员及电厂配合方,工作的重要方式包括将电厂运行以及可使电厂安全得到加强的联合审查方法;
- WANO 组织同行审查的目标是通过来自设施外的独立工作组对电厂运行深入的、有针对性的审查,来帮助 WANO 成员们对其运行业绩与最佳国际实践进行比较。该审查根据电厂的需求进行,由一个国际工作组执行,该工作组由其他电厂的专家即被审电厂专家的同行人组成。该工作组根据特定的业绩目标和准则,在一些关键的方面对电厂的业绩进行检查。WANO 同行审查为成员提供了一个学习和分享世界电厂安全和可靠运行方面最好经验的机会,进而提高其业绩。

法国:EDF 辐射防护执行和管理的评估方法

在 EDF,每个厂址的辐射防护业绩都使用定量指标来进行评价,这些指标主要与电厂的年集体剂量及放射性清洁水平有关。辐射防护管理通过一个调查问卷进行评估,关注以下六个方面:

- 核电厂管理团队在辐射防护方面的承诺和及其实现目标的计划(Commitment of the plant management team in radiation protection and characterization of its level of ambition);
- 辐射防护管理质量;
- 当地和外来工人们 在辐射防护方面的参与度;
- 保健物理部门的能力和效率;
- 辐射防护的运行控制;
- 放射性物质运输流的可靠性(Robustness)。

瑞典:OSART 的审查结果(Forsmark 核电厂)

在 2008 年,对 Forsmark 核电厂执行了一次 OSART 审查任务。该任务研究了安全的辐射防护大纲和安全方面的所有问题。审查报告识别了应用在电厂的良好实践,并给出了改进建议供责任部门考虑。该报告可在瑞典官方网站上获得,审查结果可以得到更好地分享。

8.7 小结

对工作进行工作后评价,并采取适当且必要的跟踪行动,是任何一项任务进展中最重要的部分之一。建立一些基准对于正确执行这些评价是很有用的。由于核动力工业丰富的经验,国内和国际运行经验的数据库已经成为所有国家核电站建立基准的强有力工具。对于工作后审查,重要的是有一个包括多学科领域的团队来执行,尽可能多地考虑来自工人、合同商放入直接输入。对于建议和教训的跟踪,理想情况下也应该由执行工作后审查的多专业团队来执行。通常,跟踪将直接导致在考虑中操作的下一次执行,这样,就

形成了一个特定的闭环(工作概念、进度、计划、执行、评价和跟踪;通过每个经验教训得到的工作改进、进度、计划等),工作也得到了不断的优化和合理的改进,从而跟上当前的技术发展。

9 确保持续改进

工作管理是一个迭代的过程,它促进我们持续改进并保持警惕,以确保辐射防护维持在高水平。通过信息和经验交换,借助经验教训和不断发展的技术,不仅能够改进将来的工作行为,而且从更长远的角度来看,还有助于完善新建核动力厂的设计、建造和运行等方面,以确保剂量保持在可合理达到尽量低水平(ALARA)。

9.1 简介

在核能应用于电力生产的历史中,职业辐射防护一直是备受关注的领域。在 20 世纪 80 年代随着照射水平迅速降低,职业照射剂量已经减小到先前水平的 1/4。从那时起经过不断努力,职业照射水平得到了进一步的降低,但是降低速度放缓。这些持续的改进得以实现,不仅是靠电力公司和监管机构的努力,同时也得益于技术创新。从 20 世纪 90 年代起,在信息交换领域国际合作的进步,以及诸如 ISOE 等项目的良好实践,以及在 ICRP 建议书中详尽阐述的 ALARA 理念的传播,也对减少照射做出了很大贡献。

在各领域都有一系列的与减少照射相关的技术。这包括源项减少技术、去污技术,以及机械化、自动化和远程监控技术。正如先前章节所述,这些用于辐射防护和提高工作效率的技术已经在核工业中得到广泛应用。但是,这些技术的持续开发和进一步的应用还应注重考虑在将来会变得重要的一些辐射防护问题,包

括新建造或新设计电站的照射减少(具有潜在的不断增大的重要性),与反应堆老化和寿期延长相关的需要进行的大规模改造工作,以及反应堆退役等。

在前面章节里已经讨论过一些这类技术及其应用的例子。本章将总结另外一些值得关注的,与确保职业辐射防护持续改进密切相关的技术和工作管理方面的内容,特别是针对新建核动力厂(设计和建造)。需要指出的是,这些技术和工作管理方面的内容大部分也适用于正在运行中的核动力厂的照射水平的进一步降低。

9.2 新核动力厂设计和建造中的源项降低

清洁电厂

为了保持核动力厂中剂量率处于低水平,保证能够进入反应堆堆芯并随后被活化的腐蚀产物的量在尽可能的最低水平,是非常重要的。换言之,需要在设计和建造阶段就保持反应堆的清洁。这些努力也将对保护系统管道和设备的完好做出贡献。

日本:清洁电厂措施(女川,柏崎-刈羽和滨冈核电站)

日本的核电站,包括女川,柏崎-刈羽和滨冈核电站,都采取了防污措施。女川核电站自1号机组建造以来,就通过在“清洁电厂运动”下开发的应对措施,一直致力于实现高度可靠,具有最低可能照射水平的清洁电厂。在确定的应对措施中,为了实现清洁电厂,“污垢减少措施”被放在最高优先级的位置,并且被彻底执行。

污垢减少措施可分为“结垢控制”和“除垢”。女川核电站采取的措施以主管道的“保养管理”为特点,作为除垢措施之外的结垢控制措施的一部分被彻底执行。在建造/试验/试

运行等不同阶段,系统工况都是不同的,所以女川核电站针对特定工况选择了最恰当的培养方法。比如,根据系统管道的不同工况,通过采用诸如联氨湿保养(wet lay-up method)(最大程度避免只用纯水进行保养),除湿空气干保养等措施,尽可能地抑制管道和装置内腐蚀产物的产生。另外,还开发了用于监测合适的保养条件的系统。作为采取这些应对措施的成果,女川核电站将进入核反应堆的污垢量限制在极低水平。现在,女川核电站通过其他剂量减小措施的联合实施,在实现极低剂量率水平方面保持着最好的成绩。

采用低钴材料

作为职业辐射照射主要来源的钴,来自含有钴杂质的不锈钢,镍合金和硬质合金(一种钴合金)。因为不锈钢被大量用作一回路系统的主要结构材料,不锈钢中的钴含量变得非常重要。钴铬钨硬质合金主要由钴组成,通过对其腐蚀产物的活化产生 Co-60,因此是职业辐射照射的主要来源。为了控制腐蚀产物的产生,有必要采用具有卓越的抗腐蚀性能和钴含量尽量低的材料。在世界范围内都已致力于减少材料中的钴含量,很多电厂已经在应用中采用钴含量更低的材料取代这些材料,如控制棒系统中的滚柱,给水加热器的加热管(不锈钢),燃料弹簧(镍基合金)和核反应堆系统的一些不锈钢材料等。例如,在德国(KONVOI)最新的 KWU 核电站,反应堆容器里的大部分钴铬钨硬质合金已经用无钴材料替代,大大降低了主冷却管道系统的剂量率。

从设计阶段就必须考虑低钴材料的使用,对于置于易腐蚀环境中的大表面积材料,这一点尤为重要。人们已经开发了低钴材料,和硬质合金的替代材料。例如,EPRI 已经开发出耐磨 NOREM™ 铁合金替代钴铬钨硬质合金,用于核动力厂的阀门制造。这种材料的使用能够减少导致职业照射的钴辐射源的量。

管道内表面处理

在不锈钢表面预先形成一层氧化膜能够防止管道内放射性物质的累积。通过平滑材料表面来减小黏附表面的面积,对于防止污染物的累积也是有效的。在核动力厂的建造,或更换管道或设备时,对不锈钢管道内表面机械抛光后再进行电抛光,能够防止结垢。例如,在美国 Browns Ferry 1 号机组重启之前,对阀门和管道进行了机械抛光和电抛光。在法国,在更换运行核动力厂中的蒸汽发生器以及在新的 EPR 堆型反应堆中,就需要对蒸汽发生器管道头进行电抛光。

过滤器安装

(a) 中空纤维过滤器

中空纤维过滤器由极细的中空纤维聚合物材料组成,这种材料的外径大约在几百 μm 至 1 mm 之间,内含大量的直径约 0.1 μm 的微孔。单位体积的中空纤维过滤器具有极大的过滤表面积(比其他的薄膜过滤器大 10~100 倍),能够使过滤设备的尺寸比其他过滤系统更小。

这种类型的过滤器最早是由日本于 1986 年在一个沸水堆(BWR)的冷凝系统内引入的,旨在缩短启动前的清洁时间。由于它的极佳表现,随后也被应用于净化电厂运行期间的部分冷凝系统。后来,这些过滤器在日本很多的沸水堆和压水堆冷凝系统中得到应用。就它在运行沸水堆中使用时的清洁性能而言,当过滤器入口处铁杂质的浓度范围在几千 ppb(在启动前的清洁阶段)到几十 ppb(电厂运行阶段)时,出口处过滤后的铁杂质浓度范围能够保持在 0.1 ppb 甚至更低的水平。在 1993 年后服役的电厂中,使用了完全采用这种过滤器的冷凝净化系统,主要目的是减小给水中的铁杂质水平。该系统的引入使给水中铁杂质含量降至 0.1 ppb 甚至更低的水平,对减少工作人员职业照射做出了重大贡献。

(b) 折叠式过滤器

折叠式过滤器是一种折叠起来的薄膜过滤器,从而增大了过滤表面积。折叠式过滤器最早主要于 20 世纪 90 年代早期在美国使用,从那以后得到了不断改进。因为折叠式过滤器材料是可燃的,而且不含粉末状树脂,所以有利于减少放射性废物的产生。另外,折叠式过滤器还与预涂层过滤器的过滤器外罩具有很好的兼容性。因此在应用于现存电厂系统时,只需简单地更换过滤器部件,而不需要改变过滤器外罩。

9.3 新建核动力厂的屏蔽

如 6.4 节所述,一种降低剂量率的有效措施就是辐射屏蔽。停堆期间作业时,临时屏蔽对剂量控制很有效。但是,就成本而言,相对于在每次换料期间建造和拆除所花费的时间和所受剂量,永久性的屏蔽更加高效。建造永久性屏蔽结构时,必须考虑屏蔽结构的地震安全,建造空间,进出以及监控空间。这些问题在电厂设计阶段更容易得到解决。

柏崎-刈羽核电站(ABWR)通过在设计/建造阶段为反应堆冷却清洁系统设置屏蔽降低了辐射剂量水平。另外,可设置可移动永久性屏蔽装置以便于接近设备、管道等。日本有几座沸水堆设置了可移动的永久性屏蔽装置,并有报告称通过使用这种装置,使工作时间缩短了 10%~20%,剂量率与使用临时屏蔽系统相比(铅块和铅皮)最多减小了 20%。

9.4 新建核动力厂的远程监控系统

远程监控系统(RMS)技术是 ISOE 非常关注的一个内容(见第 6 章)。该技术被证明对提高工作人员的安全水平和生产力都

有帮助。RMS 技术对提高工作效率也有帮助,因此可缩短换料周期。对于新核动力厂,在设计阶段就应考虑远程监控系统的中央控制中心。另外,为了更有效地利用 RMS 技术,需要在安全壳和干井之间提供光纤穿透孔。在电站停堆期间这些穿透孔还能缩短安装电缆的时间。RMS 技术的使用能够期望在以下几个方面带来改进:

- 照射以及辐射控制效能;
- 工作人员效率和问责;
- 工作数据和过程质量;
- 资源(人员)优化;
- 设备可靠性;
- 成本削减。

9.5 新建核动力厂的机器人技术

如 6.5 节所述,机器人技术被有效地用于核动力厂职业照射的减少。之前,机器人作为单功能技术,只用于完成一些特定的任务,比如装料和堆内检查。但是,随着机电一体化的快速发展,开发了能够胜任多种任务的多功能机器人。

机器人技术的应用尤其适用于高剂量辐射场、水下、狭窄或无法到达的空间以及恶劣工作环境等场合。还开发了用于执行一般任务或者多任务的可移动机器人,包括用于堆芯检查或预防性维修工作的水下自由移动机器人。机器人被开发并成功应用于以下特定功能:

- 反应堆顶部(head)检查;
- 蒸汽发生器管道检查;
- CRD 系统的喷嘴检查;
- CRD 交换设备;

- CRD 解体设备；
- RPV 双端螺柱张紧轮；
- 自动超声检测；
- 换料机。

另外,从提高工作效率,降低成本和辐射防护的角度出发,机器人还可能在其他情况找到应用。为了实现收益最大化,在电站的设计阶段就考虑并开发它们的应用是很重要的。

9.6 新建核动力厂的免维护部件

在核动力厂中,部件检查是导致职业辐射照射的重要原因。优化检查项目,以及利用风险信息(和其他信息)优化检查频率是很重要的,同时还需要最大限度地采用免维护部件。例如,在建造芬兰 Olkiluoto-3 电站时,作为减少照射的手段在可能存在高辐射水平的场所使用了免维护部件,并对所选择材料和屏蔽构造进行最优化考虑。

9.7 新建核动力厂的工作管理

除了技术方面以外,在新建核动力厂中职业辐射防护的持续改进也受工作管理方面的影响。培训、反馈和风险指引制度对于任何新设施的 ALARA 方面都非常关键。工作管理在维持 ALARA 文化以及避免产生自满心理方面将持续扮演重要角色。

培训

正如本报告中提到的,培训是工作计划和准备过程中的一个重要方面。与实际电站设施情况保持一致的虚拟培训,是一种使工作人员理解和掌握他们的工作程序的有效手段,最终能够提高工作效率、缩短照射时间与改进工作质量。虚拟培训对于在高剂

量辐射场所开展的工作、利用特殊工具或设备开展的工作以及一些复杂工作尤其有效。在这些情况下,培训必须在实际的电站设施中,或者与实际电站设施具有可比性的地方,在与实际工作相同的环境和物理条件下开展。在新建核动力厂中,建造用于虚拟现实或 3-D 模拟技术的设施,并将其作为教育和培训的手段,也被认为是有效的。这些技术能够用于工作现场环境的可视化以及工作程序的模拟等。

反馈(基准评价)

工作效能评价并采取能够反映评价结果的正确措施,对于成功完成计划工作和改进将来类似工作的效能是必要的。这些评价必须由各相关领域的专家组成、多学科专家组开展。但是,为了确保持续改进,有必要确保持续不断参加在各个层次上的信息和经验交流活动。这将不仅有益于运行中核动力厂的工作计划制订,还可将这些经验用于在新反应堆设计阶段更加有效地解决一些问题。这些经验交流也应当考虑由新的设计经过发展所能引起的问题,以指引将来的设计。

风险指引设计

辐射照射与开展的工作密不可分。因此,通过降低对设备、管道等检查的频率,将直接有利于辐射照射的减少。比如在美国,核监管机构需要基于风险信息对检查项目和测试频率进行评估。业主也通过开展在线的和基于实际情况的检修等方式,对检查方法进行优化。这使得容积因子以及照射减少都得到了改进。在现役核动力厂中已成功实现了基于风险指引的检查和维修,对于新建设施,也应考虑风险指引设计。

10 结 论

安全和辐射防护是核动力厂安全运行中最重要的因素。职业辐射防护的经验表明应在核动力厂生命周期的所有阶段,从设计到运行到退役,采取辐射防护措施。这样不仅能够使源项去除或减少成为了设计的一部分,而且也考虑了照射减少的方法或程序如何能在运行过程中得到最有效的执行。

在核动力厂职业辐射防护方面能够考虑到的很多方法都已在本报告中有所描述。这种基于核动力厂运行的多年经验教训的,在工作管理中存在的多学科的实际经验,以及那些仍在开发或者将来即将实现的手段,是职业辐射防护优化过程的重要组成部分,对于在面对目前和将来的挑战和机遇时确保持续改进也是非常重要的。

参考文献

- [1] EAN (2006), *European ALARA Network Newsletter No. 18*, March 2006, CEPN, Fontenay-aux-Roses.
- [2] EC (1996), *Directives of the Council of the European Commission; Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation*, Official Journal of the European Communities N° L 159; Luxemburg.
- [3] IAEA (1996), Food And Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organisation, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization, *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna.
- [4] IAEA (1999), *Occupational Radiation Protection*, Safety Guide RS-G-1.1, IAEA, Vienna.
- [5] IAEA (2002), *Optimization of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure*, Safety Report Series No. 21, IAEA, Vienna.
- [6] ICRP (1991), *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3).
- [7] ICRP (2006), *The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process*, ICRP Publication 101, Ann. ICRP 36 (3).
- [8] ICRP (2007), *The 2007 Recommendations of the International Commission on radiological Protection*, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4).
- [9] ISOE (2008), *ISOE Occupational Exposure Database*, Information System on Occupational Exposure, OECD/NEA, Paris; IAEA, Vienna.

- [10] NEA (1997), *Work Management in the Nuclear Power Industry*, OECD, Paris.
- [11] NEA (2008), *Occupational Exposures at Nuclear Power Plants, 17th Annual Report of the ISOE Programme*, 2007, OECD, Paris.
- [12] Schieber, C (1994), *Optimisation de la radioprotection et organisation du travail*, Rapport CEPN R-227, Septembre 1994, CEPN, Fontenay-aux-Roses.
- [13] UNSCEAR (2000), *Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes*. United Nations, New York, NY.
- [14] UNSCEAR (2006), *Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes*. United Nations, New York, NY.

附录 1 ISOE 项目信息

ISOE(职业照射信息系统)建立于 1992 年,旨在通过对职业照射数据和趋势的收集和分析,以及业主和国家监管机构专家的经验交流,改进核动力厂的职业照射管理。这套系统持续发展至今,现在已经能够为参与者提供全世界核动力厂职业照射管理最优化相关的综合资源。

ISOE 的成员包括了服从 ISOE 条款而加入该项目的核电业主和国家监管机构的代表。ISOE 项目的参与包括了来自 29 个国家的业主和监管机构。ISOE 的数据库本身包含了来自世界范围内 470 座反应堆机组的职业照射水平和趋势的信息(其中 396 座正在运行;74 座正在退役),覆盖了全世界 91%的正在运行的商业反应堆。想对 ISOE 项目有更多的了解,可登录 www.iso-network.net。

ISOE 由 OECD(经济合作与发展组织)的 NEA(核能源机构)和 IAEA 联合主办。ISOE 采用分权方式运行。由各个参与国家的代表组成管理委员会,在 NEA 和 IAEA 联合秘书处的支持下,提供全面指导。

ISOE 联合秘书处

OECD Nuclear Energy Agency(NEA)
ISOE Joint Secretariat
12, boulevard des Iles
F-92130 Issy-les-Moulineaux, France
Tel: +33 1 45 24 10 45
E-mail: Brian.Ahier@oecd.org

International Atomic Energy Agency
(IAEA)
ISOE Joint Secretariat
Division of Radiation, Transport and
Waste Safety
P.O.Box 100, A-1400 Vienna, Austria
Tel: +43 1 2600 22722
E-mail: P.Deboodt@iaea.org

四个 ISOE 技术中心(欧洲,北美,亚洲和 IAEA)负责管理该项目的日常运行,作为联络点负责参与方之间的信息交换。

ISOE 技术中心

Asian Technical Centre(ATC)
Japan Nuclear Energy Safety Organization
YOKYU REIT Toranomom Bldg. 8th
Fl.
3-17-1 Toranomom, Minato-ku
Tokyo 105-0001, Japan
Tel: +81 3 4511 1953
Email: hayashida-yoshihisa@jnes.go.jp

European Technical Centre(ETC)
Centre d'étude sur l'évaluation de la
protection dans le domaine nucléaire
(CEPN)
28, rue de la Recoute
F-92260 Fontenay-aux-Roses, France
Tel: +33 1 55 52 19 39
Email: schieber@cepn.asso.fr

IAEA Technical Centre(IAEA TC)
Division of Radiation, Transport and
Waste Safety
P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria
Tel: +43 1 2600 26173
Email: P.Deboodt@iaea.org

North American Technical Centre
(NATC)
RP Department-Cook Nuclear Plant
One Cook Place, Bridgman, Michigan
49106, USA
Tel: +1 269 465 5901 x2305
Email: dwmiller2@aep.com

附录 2 ISOE3 工作相关的 信息报告实例

源于 ISOE 职业照射数据库 (ISOE, 2008) 的 ISOE3 工作相关的信息报告实例

A. 总体信息		
反应堆机组名称：	年份：	编号：
堆型：	参考电站 (sister group)：	
反应堆状态：		
ISOE3 联系人：		
电话：	传真：	邮箱：
B. 简要描述		
题目：		
描述内容 (英语)：		
起始日期：		
结束日期：		
总的集体剂量：		
C. 关键词		
运行表现关键词：		
系统关键词：		
部件关键词：		
辐射防护行动关键词：		
D. 全面描述 (可用本国语言撰写)		
报告参考文献：		

附录 3 工作前 ALARA 确认表实例

工作前 ALARA 确认表			
	是	否	需要研究
有没有开展类似操作的前期经验？ 有没有考虑该经验？			
1. 对于源项的行动			
停堆前：化学过滤？ 去污？ 是否能够保持回路中水位？ 去除高放射性物质？ 其他？			
2. 防护			
生物屏蔽：固定式？可移动式？是否与机械整体集成？ 污染防止：是否配备手套箱？ 屏蔽？ 屏蔽设备是否与工具集成在一起？ 静态包容？ 动态包容？ 喷淋和排水？ 适当的个人防护？			
3. 照射条件下的工作量			
是否是关键任务？ 程序是否最优化？ 是否正确安排任务的时间进度？ 是否将完全在辐照区域执行任务？			

续表

工作前 ALARA 确认表			
	是	否	需要研究
一些操作人员是否能够远距离工作?			
操作人员的数量是否合理?			
工作安排是否最优化?			
剂量能否在操作人员之间分散 (spread)?			
有没有用于剂量减少的专用工具?			
是否有使用无线控制或机器人的机会?			
能否改进服装以利于工作实施?			
是否有可能改进周围环境(温度,光线)?			
是否有可能进行无线通信?			
是否有可能可视化监控?			
是否有可能更容易的进出?			
是否有操作设备可用?			
是否有足够的辅助设施?(脚手架等)			
是否有站立或调配区域?			
是否有设备打包或者废物封装的程序?			
是否有移除物质的程序?			

参考:(IAEA, 2002)

附录 4 工作后复查表实例

ALARA 工作后复查表实例 (NEA, 1997)

ALARA 工作后复查表						
授权文件:		RWP:				
位置:						
工作描述:						
预计工作 时间 (人小时)	实际工作 时间 (人小时)	偏差 %	预计剂量, 人·Sv 或 (人·rem)	实际剂量, 人·Sv 或 (人·rem)	差别 %	实际有效 剂量率
选择下表中的 1 项或多项, 作为造成工作比预期的人·时/人·Sv 或人·rem 高的原因。						
<ol style="list-style-type: none"> 1. 工作范围改变或者扩展 2. 工作场所辐射情况改变 3. 遇到进度安排/工作协调方面的困难 4. 由于工具/设备故障引起的工作延长 5. 由于部件/工具/设备的问题或不可用造成工作延长 6. 由于计划外的场所前期要求而引起工作延长 7. 由于其他工作的打断或干扰引起的工作延长 8. 没有充分遵从辐射控制措施 9. 没有充分考虑良好的 ALARA 实践 10. 辐射工作许可不足 11. 屏蔽不足 						
评价:						
以后的改进建议—经验教训:						
ALARA 工程师:			日期:			

事故分析表实例(NEA,1997)

事故分析表

工作鉴定

工作区域:

材料:

1. 事故分析

事故描述:

是否有任何辐射防护后果?

立即 将来可能

是否有工作环境的改变(污染,等)?

是 否

如果是:

对个人防护的影响:

对工作时间的影响:

该改变对工作安排的影响:

一处或多处剂量率的改变:

剂量率	区域	剂量率	区域

与这些剂量率相关的工作安排:

事故对照射水平的影响估计:

事故对照射水平的实际影响:

工作鉴定

工作区域:

材料:

续表

事故分析表			
2. 用于工作后复查和反馈的事故原因分析			
1. 不恰当的程序		2. 信息,沟通,培训	
总体步骤	<input type="checkbox"/>	工作人员培训差或不足	<input type="checkbox"/>
将工具带入工作场所的程序	<input type="checkbox"/>	不充足或错误采用的培训项目	
训练程序	<input type="checkbox"/>	技术项目	<input type="checkbox"/>
移除工具的程序	<input type="checkbox"/>	ALARA 项目	<input type="checkbox"/>
废物移除程序	<input type="checkbox"/>	培训演练:	没有 <input type="checkbox"/>
防护程序	<input type="checkbox"/>		不足 <input type="checkbox"/>
个体防护	<input type="checkbox"/>	沟通不畅	<input type="checkbox"/>
集体防护	<input type="checkbox"/>	错误的语言信息或疏忽	<input type="checkbox"/>
干预的辐射防护程序	<input type="checkbox"/>	错误的或部分错误的技术信息	<input type="checkbox"/>
服务用空气/水的安装	<input type="checkbox"/>	地图错误	<input type="checkbox"/>
其他	<input type="checkbox"/>	其他	<input type="checkbox"/>
3. 工作管理		4. 工作场所预先准备和工作条件	
缺失工作前分析	<input type="checkbox"/>	工作场所安排不当	<input type="checkbox"/>
工作人员任务分配不当	<input type="checkbox"/>	工作场所清洁不足和安排不当	<input type="checkbox"/>
工作前计划不当	<input type="checkbox"/>	照明/噪声	<input type="checkbox"/>
没有按照工作计划执行	<input type="checkbox"/>	缺少或没有适合的手脚手架	<input type="checkbox"/>
协作较差:		工作限制	工作位置 <input type="checkbox"/>
工作人员之间	<input type="checkbox"/>	照明	<input type="checkbox"/>
小组之间	<input type="checkbox"/>	加热	<input type="checkbox"/>
公司之间	<input type="checkbox"/>	其他	<input type="checkbox"/>
缺少可用的:			
工作人员	<input type="checkbox"/>		
工具	<input type="checkbox"/>		
不适用的工具	<input type="checkbox"/>		
其他	<input type="checkbox"/>		
5. 工具引起的事件		6. 人因引起的事件	
工具失效	<input type="checkbox"/>	不遵守规定或流程操作引起的失误	<input type="checkbox"/>
缺少服务用气/水	<input type="checkbox"/>	诊断错误	<input type="checkbox"/>
工具检查失误	<input type="checkbox"/>	非适应性反应	<input type="checkbox"/>
通信设备失效	<input type="checkbox"/>	反应时间太慢	<input type="checkbox"/>
其他	<input type="checkbox"/>	物理失效	<input type="checkbox"/>
		其他	<input type="checkbox"/>
通过与工作组讨论得到事故原因的反馈,以在事故起始阶段对其进行鉴定并进行分级。			

工作后会议指导表实例 (NEA, 1997)

工作后会议指导表		
需要与工作组负责人讨论的		
工作鉴定： 工作区域： 材料： 工作描述： 会议参加者：		
	是	否
1. 需要的工具或材料在恰当的时机都可用吗？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. 开展任务的工作区是否在你到达时已准备好？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. 防护措施是否适合在工作区开展的工作？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. 拥有多长时间做准备工作？时间是否足够？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. 其他工作是否影响你的任务？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. 工作场所是否整洁有序因而利于工作开展？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. 工作组成员了解自身的照射水平吗？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. 你是否坚持对照射作尽可能多的限制？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. 工作组意识到该工作的剂量目标值吗？工作组积极性高吗？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. 与其他工作组, 其他部门之间存在协作的问题吗？ 遇到过什么有可能导致受照剂量升高的问题？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. 在执行方案解决问题时, 是否存在困难？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. 是否存在管理问题？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13. 是否存在允许你减少照射的特殊事件？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14. 下次还会采用相同的方式执行该任务吗？	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15. 你认为应该对工作的步骤作变更吗？ 如果是肯定的, 变更的内容如下：	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

附录 5 放射建议表实例

放射建议表					
1. 建议提供人					
姓名：	部门：	分机号：	邮箱：	日期：	
建议所关系到的工作区域或程序：					
建议描述：					
建议理由：					
2. 建议评估					
单选：					
放射性改进	<input type="checkbox"/>				
ALARA 改进	<input type="checkbox"/>	(如果该建议能改进 ALARA, 附上代价利益分析文档)			
该建议改进措施的估算成本是什么？					
该建议有助于减少照射吗？					
该建议改进措施的估算收益是什么？(必要的话附上额外信息)					
该建议需要花费的成本不合算, 但是必须执行				<input type="checkbox"/>	
该建议不应当被执行				<input type="checkbox"/>	
附件	<input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 无	该建议成本合理, 应当执行		<input type="checkbox"/>	
推荐将建议的工作分配到：					
意见：					
签字(S-RE)：		日期：			
3. 最终回复/批准					
建议被批准	<input type="checkbox"/>	建议没有被批准	<input type="checkbox"/>	CCT	<input type="checkbox"/>
执行部门负责人：			日期：		
建议执行负责人：					
D_PRP：			日期：		