

论核电站大修换料期间的辐射防护最优化实施
The Implementation of Radiation Protection Optimization during Nuclear
Power Plants Maintenance Outage

黄 鸿
(核电秦山联营有限公司, 浙江海盐, 314300)

摘 要 简单论述了辐射防护最优化以及影响最优化的一些因素, 对秦山第二核电厂1号机组首次大修换料过程中的辐射防护最优化实施, 参照国际上的数据做了分析与评价, 并提出了一些想法和建议。

关键词 辐射防护 最优化 大修换料 剂量

Abstract The article simply dissertates the optimization of radiation protection and some elements affecting the optimization. The implementation of first plant refuelling & maintenance outage for unit No.1 of NPQJVC is analyzed and evaluated with references of data from some international publications. And some ideas and suggestions for improvement of optimization are raised.

Key word Radiation protection Optimization Maintenance outage and refuelling Dose

辐射防护的三个主要原则之一就是辐射防护最优化。

辐射防护最优化, 早在1965年ICRP (国际辐射防护委员会) 出版物中就有描述: 对于在任何特定源项实践中所产生的照射, 除了甲状腺放射性治疗外, 对于个体所接受的剂量必须保持在合理可行尽量低的水平下 (ALARA), 同时必须考虑经济和社会因素受到的影响。

因此, 对任何一种与电离辐射相关的实践, 就不仅仅是在获益后才考虑辐射防护的最优化, 而是贯穿于立项、选址、设计、设备选型、建造、生产组织机构的建立、运行、维护、退役等整个实践过程中

对在役的商用核电站, 辐射防护最优化主要体现在运行和维修过程中, 对于压水堆型核电站, 又以每一次的换料大修为重点。据ISOE (职业照射信息系统) 第11次年度报告的信息显示 (不完全统计), 在已加入ISOE国家的所有商用核电站中, 换料大修期间产生的集体剂量份额约占一个换料周期所有集体剂量的65%-97%之间。所以, 辐射防护最优化的实施, 特别是在大修期间的实施, 将有利于降低集体剂量, 减小职业辐射工作人员所受到的伤害。

本文引用秦山二核1号机组首次 (101) 大修换料的事例, 对核电站的辐射防护最优化进行了简单分析, 一些论点及数据参考了IAEA安全报告系列第21号、ISOE第11期年度报告“核电站的职业照射”及ISOE的10年经验报告。

1 基本的辐射防护最优化考虑

与辐射相关的活动, 必须在实施之前进行辐射防护最优化的考虑, 而集体剂量是其重要的业绩目标。

一项作业的集体剂量与参加该项活动的所有作业人数、作业人员所处位置的辐射场剂量率以及作业人员在具体辐射场中停留的时间有关。要想降低集体剂量, 有以下三种方法: 即减少参加作业的人数、降低作业人员所处环境的剂量水平和减少作业人员在辐射场中的停留时间。

因此, 要做好辐射防护最优化, 就必须找到能够影响以上三个方面的因素。下面分析一下可以影响这三个方面的因素:

(1) 减少参加作业的人数

- 1) 准确地评估该项作业的工作量;
- 2) 认真做好同类作业的经验交流;
- 3) 采用合适的、先进的作业器具;
- 4) 合理地考虑那些必须在辐射现场才能实施的项目;
- 5) 不要考虑人员的现场培训, 即: 使用那些技术熟练的人员。

(2) 减小作业人员所处环境的剂量水平

- 1) 去除或减少源项;

综 述
核 电 设 计
工 程 管 理
工 程 建 造
运 行 维 护
核 安 全
核 电 前 期
核 电 论 坛
核 电 经 济
核 电 国 产 化
质 量 保 证
核 电 信 息

- 2) 考虑屏蔽效应，即降低源项的影响；
- 3) 增加操作距离，即采用合适的、先进的作业器具；
- 4) 采用合理的防护用品，以降低表面污染或内照射的几率。

(3) 减小作业人员在辐射场中的停留时间

- 1) 合理地安排作业计划；
- 2) 科学地编制作业程序，必要时建立ALARA行动单；
- 3) 使用技术熟练的作业人员；
- 4) 作业实施前考虑专门培训和模拟演练；
- 5) 采用合适的、先进的作业器具；
- 6) 良好的信息沟通渠道。

在所有这些因素中，最彻底的是去除、减少或降低源项，其次是采用合适的、先进的作业器具以及使用技术熟练的作业人员，所以，一些良好的实践往往是屏蔽、合理的技术改造、合理的作业器具的使用以及培训方法、培训设施的改进。

2 换料大修过程中的最优化实施

本文就本次101换料大修中的具体事例分析辐射防护最优化的实施。

2.1 事例简介

本文引用101换料大修中的三项作业情况简介如下表。

作业名称 稳压器开人孔 余热排出系统（RRA）
 下泄管线的改造 化容系统（RCV）下泄孔板的改造
 作业内容 开稳压器人孔盖板，
 并加上临时盖板。 管道切割、切割口打磨、
 焊接、管道支架安装 管道切割、切割口打磨、焊接
 作业人数 7人 8人 7人
 作业点环境剂量率 ~40 μ Sv/h ~0.5mSv/h ~0.35mSv/h
 作业点处热点剂量率 ① 190 μ Sv/h
 ② 240 μ Sv/h
 ③ 220 μ Sv/h ① 0.8 mSv/h
 ② 1.2 mSv/h
 ③ 0.8 mSv/h ①1.2 mSv/h
 作业所用时间 ~2hrs ~15hrs ~20hrs
 剂量降低措施 无 建立临时屏蔽 建立临时屏蔽
 其他防护措施 建立负压室，配自背式呼吸器 作业时穿铅背心 作业时穿铅背心
 集体剂量 ~100 \times 10⁻⁶man?Sv ~13.844 \times 10⁻³man?Sv ~5.441 \times 10⁻³man?Sv
 最大个人剂量 / 2.437mSv 0.971mSv
 最大个人剂量工种 / 管工 管工

2.2 分析评价

2.2.1 最优化的良好实践

(1) 三项作业都编制了辐射防护方案

辐射防护方案能够有效地降低辐射工作人员所接受的剂量，防止辐射事件（事故）的发生。合理的、科学的辐射防护方案必须和作业工艺过程紧密地结合，辐射防护方案应融入作业工艺程序，而作业工艺程序应满足最终的辐射防护方案的要求。本次三项作业按以上要求都编制了辐射防护方案。

(2) 在稳压器开人孔现场搭设负压棚

由于稳压器开人孔作业是一项一回路开口作业，可能存在一定量的放射性气体或微尘颗粒。因此，搭设负压棚，可以将放射性气体或微尘的扩散控制在负压棚内并通过抽气过滤系统排出，不会对附近其他区域作业的人员造成辐射伤害（这种伤害即可能有体内污染、体表污染，还应考虑外照射的贡献）。

(3) RRA下泄管线改造的屏蔽措施，有效地降低了源项

RRA系统的剂量比较高，热点也较多，在现场改造实施前，辐射防护人员对热点进行了铅板屏蔽，屏蔽后的现场测量结果仍然偏高，就根据工艺系统的工况，将主要的剂量来源热交换器二次侧充满设备冷却水，进一步降低了现场剂量率，具体的测量数据见下表（除环境剂量外，其余皆为接触剂量率）：

RRA改造现场屏蔽前后剂量率测量表（单位：mSv/h）

测量点 RRA热
 交换器A列 RRA热
 交换器B列 RRA
 下泄管线 RCV
 下泄管线 环境
 剂量
 屏蔽前 3.3 4 1.3 1.3 1.8
 仅铅屏蔽 1.3 1.8 0.7 0.8 1.2
 充水后 0.8 1.2 0.5 0.8 0.5

经过屏蔽后，两个最高的热点剂量率分别下降了76%（A列）、70%（B列），使得环境剂量率下降了72%。如果不建立屏蔽，则集体剂量约为 $25 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，实施屏蔽后，实际作业集体剂量为 $13.844 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，搭设铅屏蔽集体剂量为 $6 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，共节省了 $5.156 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，所达到的效果是显而易见的。

（4）RRA改造过程中严格控制了只能在辐射控制区内实施的内容

在RRA改造实施前，作业人员与辐射人员共同讨论了整个实施过程，过程当中有一节增加的管道（带阀门），一种方法是利用切割下的管道，另配一只阀门和一段管道（共要接受剂量 $440 \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ），另一种是不再利用切割下的管道，在控制区外配管和阀门，然后到现场再进一步加工（只需接受剂量 $20 \times 10^{-6} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ）。最终确定了后一种方法，节省了 $420 \times 10^{-6} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ 。

2.2.2 尚待改进的领域

（1）作业人数配置

在稳压器开人孔作业中，配置了7名作业人员，而根据现场的作业量，4~5人应能完成这项作业，因而人员配置过多，不仅增加了受照人数，还相应增加了一次性废物产生量。因此，作业前必须对作业量进行评估，并参考其他相似作业的信息，合理制定本项作业的配置人数和配置工种，以满足最优化的要求。

（2）信息沟通和交流

稳压器开人孔作业时，由于信息沟通产生的原因，整个作业组三进三出控制区，共耗时85人·工时，而实际作业过程只应耗时30~40人·工时，造成的后果是增加了受照人次（为20人次左右），增加了受照时间（为4 h/人），增加了他人的劳动强度（如放射性洗衣房，多洗20套防护服，并多产生放射性废水量），增加了废物产生量（如一次性鞋套、一次性口罩、医用乳胶手套等）。因此，广泛的、通畅的信息沟通和交流渠道不仅能够保证一项与辐射相关作业能严格按照预先制定的计划实施，避免意外的辐射事件发生，同时可以避免一些不确定因素对该项作业产生影响。

（3）作业现场条件确认及工器具可用性确认

在稳压器开人孔作业中，作业区附近墙上-380 V电源不可用，使得螺栓拉伸机无法使用；SAT工业用压缩空气不可用（压缩空气中含有大量锈水），后改为自背式呼吸器；建立负压棚时新领用的电源接线盘不可用；这些都拖延了作业进程，增加了在控制区内的停留时间，从而增加了集体剂量。因此，现场条件是否满足，作业能否顺利实施，所使用工器具是否能加快作业进程或提高作业质量，这些因素都会影响到辐射防护最优化。

（4）屏蔽设置次序的考虑

在RRA改造实施过程中，屏蔽的设置较好地降低了作业现场的辐射场剂量率，但屏蔽设置的次序仍旧存在改进之处。在实际的设置过程中，在环境剂量率为 1.8 mSv/h 的条件下先搭设了铅屏蔽（实际操作点因靠近热点，剂量率还要高），后充水屏蔽，整个屏蔽设置集体剂量为 $6 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，而如果先充水屏蔽（充水屏蔽时运行人员的现场操作也将接受一些剂量，但不会太高），将环境剂量降至 1 mSv/h 左右，再搭设铅屏蔽，则集体剂量可降至 $3 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，降幅达到50%。因此，不仅仅是屏蔽次序的考虑，还有作业次序的考虑也是最优化的重要方面。

（5）污染控制问题

放射性污染控制似乎与辐射防护最优化没有直接关系，但发生污染后所产生的一系列后果却表明，如果污染问题没有控制好，也会给集体剂量的降低带来负面影响。在RRA和RCV改造中，都发生了少量放射性液体从切割开的管道中流出的情况。首先焊接工艺要求焊点处要干燥，这样就延误了作业时间，其次流到地面或设备表面的溶液造成了放射性表面沾污，必须由核清洁人员进行去污，这两方面产生的剂量都增加了作业的集体剂量。

（6）频繁更换作业人员，即作业次序和人员安排的合理性

在大剂量场环境的作业中，作业次序和人员安排的合理考虑和安排会对集体剂量的降低做出较大的贡献。应从工艺要求和辐射防护最优化共同来考虑作业次序，在人员安排方面首先考虑那些技术熟练的人员，既能够保证施工质量（不会导致返工），同时缩短作业时间，但必须避免频繁更换作业人员。这是由于更换人员时有一个交接过程，应该尽量减少交接，同时更换人员使得作业质量的控制成为问题。在剂量控制方面既考虑该人员的剂量限值，也要考虑大修的辐射防护控制目标，在这些条件的前提下相应固定作业人员，作业人员的相对固定带来的另一个益处是可以减少放射性废物的产生量。

（7）工艺过程控制

在RRA改造以及RCV改造作业中，由于焊接方法是氩弧焊，在焊接前需充氩气以保证焊接质量，但现场作业条件使得充氩气非常困难，使焊接质量难以控制。在RRA改造中，一个焊口返工一次，而RCV改造中焊口返工次数为三次，分别使集体剂量增加了约 $1 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ （RRA改造）和 $1.2 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ （RCV改造）。因此，辐射防护必须与工艺过程紧密地结合在一起，除辐射防护工作人员之外，其他工艺技术人员也应该最大程度地分析和评估作业现场需采用的工艺方法，使得这种工艺方法或措施能够在作业现场使用并保证作业质量和作业时间，使辐射防护最优化。

（8）项目编号、剂量统计有待于完善

本次大修在项目编号及剂量统计方面的做法有待改进。有一些活动，特别是那些在高剂量场中实施的维修活动中一些辅助活动，如拆保温层、搭设屏蔽用的脚手架、搭设铅屏蔽等，其作业编号并未纳入将实施的维修活动编号，因而其剂量信息没有统计入该项维修活动，而这些辅助活动在实施时其环境剂量还要高于维修活动开始实施时。如RRA改造，目前统计的集体剂量为 $13.844 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，而仅搭设脚手架和铅屏蔽的集体剂量估算是 $6 \times 10^{-3} \text{ man}\cdot\text{Sv}$ ，尚不包括拆保温和恢复保温，但这些辅助活动是维修活动的一部分，应该将其统一考虑。

（9）辐射防护用品的改进

在一次很简单的现场作业中，本人观察到，作业人员在松一颗螺丝时将防护用棉纱手套脱掉，询问原因，答复是螺丝太小，戴着手套操作不方便，但脱掉棉纱手套违反了控制区内作业的辐射防护规定，因

为这有可能造成手被污染。作业人员显然应该遵守控制区内的各项规定，但多种多样的防护用品也应该更多地考虑舒适性和可操作性，即所谓的人性化考虑。因此，配置的防护用品的使用是否使作业人员感觉到作业方便和舒适，将对作业人员的操作、作业时的心情，产生很大的影响，同时也对辐射工作人员自觉遵守各种辐射防护规定产生较大的影响，穿戴方便和舒适的辐射防护用品有利于辐射防护最优化的实施。

(10) 屏蔽材料的类型及搭设工器具的改进

屏蔽的设置是辐射防护最优化实施过程当中非常重要的内容，但往往屏蔽设置时剂量场总是该项作业环境下最高的，而作业环境总是不尽相同，给屏蔽搭设造成很大的麻烦，使得屏蔽设置人员接受的剂量占了不小的份额。因此，如何尽量减少该部分剂量对整个作业集体剂量的贡献也是必须要考虑的。

首先是屏蔽材料的多种化，本次大修使用的屏蔽材料为铅板，对于 γ 辐射的屏蔽效果是很好的，但缺点是较重，现场不易操作，有很多场合必须与脚手架配合使用。而水砖则由于单块体积很小，能够较好地与现场的环境匹配，且搭设不需脚手架配合，能弥补铅屏蔽材料的一些不足，具有很好的效果。其次是脚手架的材质和可操作性考虑，脚手架的材质应该轻且结实，结构的设计应能快速地搭设并挂上铅板，使屏蔽搭设人员在高辐射场中停留的时间尽可能短。

本次大修在辐射防护最优化方面做了不少工作，由于秦山二期1号机组在2002年4月刚投入商业运行，积累的数据有限，现仅列出以下两个数据来进行评价：

2002年的集体剂量（没有大修）： $22.982 \times 10^{-3} \text{ man?Sv}$

101大修换料集体剂量（2003年4月4日~6月4日）： $288.210 \times 10^{-3} \text{ man?Sv}$

从这两个数据看出，大修集体剂量与全年集体剂量之比为92.6%，与ISOE统计中的数据相比也是吻合的。

3 建议

辐射防护最优化是一项长期的、严谨的、细致的工作，从上面的分析可以看出，仍旧有许多方面需要改进。最优化不仅仅是针对一项作业，而核电站管理层应把中、短期剂量减低计划，长期剂量减低计划也纳入辐射防护最优化的内容中。国外核电站在进行了辐射防护最优化之后，集体剂量的趋势逐年下降。鉴于此，笔者有以下一些建议。

3.1 建立辐射防护最优化理念

所有活动都是由个人行为组成的，一项集体活动，既包含了管理层的个人行为，也包含了实施层的个人行为。而对于辐射防护最优化，只有在个人行为都做到了最优化，才是根本上的最优化。因此，在每位员工的心目中建立起辐射防护最优化的理念，使每个人都会考虑：我为辐射防护最优化做了些什么，怎样做才能既完成了工作，又降低了接受的剂量。只有这样，才能使最优化得以良好实施。

从管理层的个人行为来说，必须为实施层的个人行为建立清晰的、准确的、可实施的管理程序，使实施层清楚地知道如何去实施每一项具体的工作；必须为实施层的个人行为创造良好的作业环境和条件，使实施层能够心情愉快地工作；必须为实施层的个人行为制定行为目标，使实施层的工作具有挑战性。

从实施层的个人行为来说，必须严格地执行已颁布的管理程序，规范自己的行为；必须不断地充实自己，不仅能够胜任自己的工作领域，还能够给管理层提供良好的建议；必须具有工作的主动性和责任心，能够主动地发现、处理、解决问题，能够弥补管理方面尚不完善的领域。

3.2 加强非量化的辐射防护最优化指标

辐射防护最优化，目前都是以量化的指标来衡量，如一项作业的集体剂量，最大个人剂量等，是否通过最优化的分析和措施使其得到了合理的下降；通过不断地实施最优化，是否使得每年的集体剂量有所下降。但通过了一段时期的实践，发现仅有量化的指标是不够的，因为量化指标只是衡量最终的结果，而最优化实施过程并未考虑在内，因此IAEA安全报告系列第21号“职业照射控制中的辐射防护最优化”中提出了一些非量化的指标，这些非量化指标分别是：人员的承诺，提高作业人员的知识层次，让所有人员参与最优化，信息交流系统的有效性，及时的培训。

如果这些非量化指标能够得以良好实施，将极大地提高一个与辐射相关活动的辐射防护最优化，并且将从整体上提高辐射防护最优化水平。

(1) 人员的承诺。从高级管理层到每一名作业人员，凡是直接或间接与辐射活动相关的人员，都应对辐射防护最优化做出承诺，即尽自己的最大努力使辐射防护最优化融入每一项思维和活动中。

(2) 提高作业人员的知识层次。要提高每一位作业人员的知识层次，能够使他们清楚地了解年度的和相关作业的剂量控制目标值，并且尽可能地了解如何做才能做得更好。

(3) 让所有人员参与最优化。所有的人员，包括管理层和具体员工，都应该参与辐射防护最优化，从最优化分析、最优化实施到交流与反馈。

(4) 信息交流系统的有效性。这个领域强调有效性，即任何关于辐射防护最优化的信息交流都应该是有效的，而不是一种形式，包括实施前的最优化分析、最优化措施的经验交流、最优化实施过程中的协调、各种数据的积累以及最优化评价。

(5) 及时的培训。任何辐射作业，凡是需要做最优化的，最终都将以程序文件的形式给出以保证最优化顺利、有效地实施，但最优化仍在不断地完善和改进，因此，关于最优化程序的培训，特别是对那些经过变更的程序的及时培训，是非常必要的。应该记住，最优化过程是一个动态过程，将永远被不断地改进。

3.3 关于最优化评价

对最优化进行评价，是最优化实施是否合理、最优化是否能得到不断改进的重要保证。并且这种评价应该在作业开始之前就进行预评估，以保证最优化实施的合理性，对现场的剂量环境进行测量和评估，定出具有挑战性的剂量目标值，在作业结束后进行评价，做好经验反馈，为其他的相关作业提供有

价值的最优化信息。

对辐射相关作业进行预评估，保证最优化实施的合理性，包括：必须得到相关的因素以制定作业的剂量目标；必须说明作业现场的环境条件；必须将作业组与防护组有机地结合；作业过程的描述，以便进一步优化。

对特定的作业及辐射环境进行分析，保证最优化的有效性，包括：

- 1) 作业描述，包括剂量条件（剂量率、表面污染、空气污染），作业条件（现场停留时间、现场温度、照明、作业位置等），人员和设备，协调（是否有其他作业产生各种影响）；
- 2) 作业分析，包括个人剂量限制，集体剂量目标，来自于其他可参考作业的信息；
- 3) 剂量降低措施，包括可能的设备、工器具的改进，防护用品的改进，屏蔽措施及污染控制；
- 4) 作业计划，包括可选择的作业时间段，作业人数，作业次序和作业组织机构；
- 5) 剂量，包括预期的个人剂量和集体剂量；
- 6) 经验反馈的准备，包括必须记录的数据，作业性能评价等以满足作业后的反馈要求。

对最优化的实施进行监督是最优化过程中不可缺少的一个环节，而且这种监督应该由辐射防护部门以外的部门来实施，能够对最优化从计划、分析、实施到最终的反馈给出一个客观的评价，以保证最优化的完整性和合理性，这也是所有人员参与最优化的一个方面。

3.4 开展代价—利益分析

目前，在辐射防护最优化领域，有一系列的技术被采用，如代价效果分析、代价—利益分析、多重效应设施分析及多重准则级别分析，而被大多数核电站采用的是代价—利益分析。

代价—利益分析不是一项新的技术，但作为辐射防护最优化领域，这是第一次被ICRP将其引入最优化。

一项与辐射相关的活动，要不要做最优化，特别是需要花费较大数量的财务支出时，对决策层而言，这种决定往往难以做出。因此，如果利用代价—利益分析，那么这种决策可以变得相对简单。

4 结束语

辐射防护最优化是每个国家每座核电站追求的目标，但决不仅仅是辐射防护领域的工作，辐射防护最优化是一项综合性、多阶段、自始至终的工作，所有工作人员（包括管理层与实施层）的理念、他们所接受的培训、人员的素质以及他们的责任心，都能对辐射防护最优化做出贡献。同时，最优化是无止境的，它要求时时刻刻的参与和改进。全世界各国的核电站、特别是欧洲的核电站，都已经在辐射防护最优化领域做了大量的工作，并且还在继续努力。我们只有通过不断地总结和反馈，才能真正地使辐射防护最优化。