

文章编号：0258-0926(2019)05-0001-05; doi:10.13832/j.jnpe.2019.05.0001

# 核动力舰船辐射安全体系与设计统筹

林晓玲

海军研究院, 北京, 100077

**摘要:** 辐射安全是核动力舰船战斗力的重要保障, 但辐射安全系统占用舰上资源过多可能降低战斗力性能, 因此辐射安全最优化设计是核动力舰船设计的重要任务之一。本文构建了核动力舰船辐射安全体系, 针对性地分析了辐射安全分系统应具备的功能、设计需考虑的主要问题和控制要求, 以及内外部协调关系和统筹考虑等, 旨在使核动力舰船辐射安全设计最优化。

**关键词:** 核动力舰船; 辐射安全体系; 统筹

**中图分类号:** TL943 **文献标志码:** A

## Radiation Safety System and Its Design Coordination for Nuclear-Powered Ship

Lin Xiaoling

Naval Research Academy, Beijing, 100077, China

**Abstract:** Radiation Safety is of great importance for the combat effectiveness of nuclear-powered ships, while overemphasis on radiation safety could influence the performance of carriers negatively. As a result, the optimization of radiation protection is the crucial task in the design of nuclear-powered ships. To achieve this goal, the system of radiation safety for nuclear-powered ships is constructed. The function, main problems to be considered, the control index, the relations and cooperation from inside and outside is analyzed.

**Key words:** Nuclear-powered ships, Radiation safety system, Coordination

### 0 概述

辐射安全设计是核动力舰船设计的重要内容。核动力舰船以反应堆为主推进动力, 具有长续航力等显著优势, 但也存在辐射安全风险。反应堆在释放巨大能量的同时, 还将产生大量放射性物质, 并伴随发射大量高能射线, 因此, 有效控制“辐射源”、确保舰员和工作环境的辐射安全是核动力舰船设计的重要任务之一。为此需要建立诸多辐射安全技术手段和措施, 任何单一的辐射安全手段都无法独立有效地完成辐射安全目标, 需要各种手段协同作用。因此, 构建完善的辐射安全体系, 是辐射安全设计的首要工作。

辐射安全设计必然占用宝贵的舰船资源, 最主要的是重量和空间, 过多使用这些资源将严重影响舰船的战斗性能。因此, 如何在保证辐射安全前提下, 最少量地占用舰上资源、充分发挥核动力舰船的优势是核舰船设计不得不面对的重要技术难题。科学统筹辐射安全体系内部关系及其与其他系统和总体设计的关系, 是实现辐射安全设计最优化的关键, 也是提升舰船战技指标的必由之路。

### 1 核动力舰船的辐射安全体系

核动力舰船的辐射安全体系基本构成: 剂

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-07-03

作者简介: 林晓玲(1968—), 女, 研究员, 主要从事辐射安全科研工作

量约束；辐射屏蔽；放射性包容系统；辐射分区；放射性废物处理系统；辐射监测系统；个人辐射监测与防护系统。核动力舰船辐射安全体系构成见图 1 所示。

### 1.1 剂量约束

1.1.1 剂量约束值的概念和应用 国际原子能机构 (IAEA) 对“剂量约束值”的定义是：对辐射源可能造成的个人剂量预先确定的一种限制。它是与辐射源相关的、被用作对所考虑的辐射源进行防护和安全最优化设计时的约束条件。剂量约束值是预期的，在进行辐射防护最优化设计<sup>[1]</sup>时，必需确保个人剂量不超过约束值。在应用中应特别注意的是不允许超过的剂量下限值，而不是允许达到的剂量上限值。辐射源不同，其剂量约束值也不同，剂量约束值总是低于剂量限值。

1.1.2 舰船剂量约束值的确定 防护与安全最优化是辐射安全基本原则之一，剂量约束值是辐射安全设计的基础，主要用于防护与安全最优化过程。最优化过程的目的是防止或降低未来的照射<sup>[2]</sup>，应在考虑所有相关方面的基础上进行系统设计。核动力舰船辐射安全设计，也必需首先确定剂量约束值，即为最优化设计提供一个上限控制值。在此基础上，开展最优化防护设计，分析舰员的预期受照剂量，并与剂量约束值比较。根据比较结果对防护设计进行反复迭代，通过对不同的防护方案分析比选确定最佳方案。值得注意的是防护的最优化并非是剂量的最小化，最优化的防护一定是对辐射危害和保护个人可利用资源进行权衡的评估结果，因此，最佳选择未必是剂

量最低的选择。

### 1.2 辐射屏蔽设计

1.2.1 辐射屏蔽功能和组成 辐射屏蔽是控制贯穿辐射的主要手段。为保证舰员和设备免受射线损伤，必需设置足够的屏蔽。反应堆通常设置 2 道屏蔽，即一次屏蔽和二次屏蔽。根据需要，还可能设置局部屏蔽。一次屏蔽用以屏蔽反应堆堆芯辐射源，旨在降低堆舱辐射水平，便于人员进堆舱检修；二次屏蔽也叫生物屏蔽，用以防止和减弱一次屏蔽表面泄漏出的中子和  $\gamma$  射线以及一回路系统设备中的中子和  $\gamma$  射线的贯穿辐射，其目的是将全部电离辐射降低到人员安全所允许的水平；局部屏蔽是对堆舱中辐射水平较高的某些设备和位置单独设置的屏蔽，旨在降低其周围辐射水平，便于人员维修。

### 1.2.2 辐射屏蔽的最优化与设计统筹

#### (1) 屏蔽设计与总体设计的统筹

屏蔽设计与总体设计应同步开展，并进行充分地协调统筹，重点研究反应堆堆舱定位和堆舱周围布局，包括堆舱邻舱的功能设置和占用空间大小，这直接影响相关屏蔽体的设计厚度。屏蔽设计还应与核动力装置系统设备布置和结构设计协调进行，尽量减少屏蔽体体积，确保设计的屏蔽体合理、有效与可靠。

#### (2) 屏蔽设计与辐射分区设计的统筹

最安全的辐射屏蔽设计是使堆舱辐射水平越小越好、二次屏蔽以外的区域达到本底水平，但这种设计所付出的资源代价是总体设计无法承受的。为解决屏蔽设计的优化问题，既使屏蔽重量

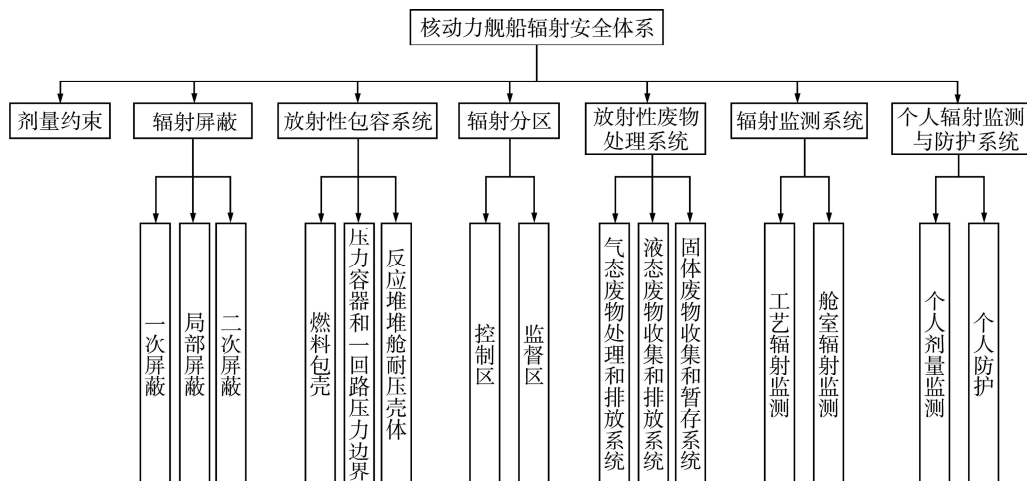


图 1 核动力舰船辐射安全体系构成图

Fig. 1 Composition Chart of Radiation Safety System of Nuclear-Powered Ships

尽量小，又保证辐射安全，屏蔽设计还应与辐射分区设计（详见 1.4 节）统筹考虑，就是将辐射屏蔽以外辐射安全仍然“薄弱”的区域按辐射水平进行管控，未来运行过程中通过采取防护措施确保辐射安全。具体地说，就是将堆舱和二次屏蔽以外的一定区域划分为控制区或严格控制区，在这些区域以内不设工作岗位或限制人员停留，当舰员需要进入这些区域时，应采取规定的防护措施。

### （3）一次屏蔽与二次屏蔽之间的统筹

铅对于屏蔽  $\gamma$  光子十分有效，是一次屏蔽和二次屏蔽的主要材料，具有不可替代性。理论上，铅屏蔽体越厚，屏蔽效果越好，但屏蔽越厚，占用的重量资源越大，这将大大影响舰船的航行速度和其他战技指标。中子屏蔽通常采用水和轻型材料，占用空间较大。因此，优化屏蔽设计，减轻屏蔽重量和体积是设计中不得不面对的技术难题。在达到同样屏蔽效果的情况下，一次屏蔽和二次屏蔽所占资源存在“此消彼长”的关系；而在总资源一定的情况下，两者所占资源比例不同，屏蔽效果也将不同。最优化的屏蔽设计就是用最小的重量和空间得到最好的防护效果。因此，一次屏蔽与二次屏蔽应联合设计，进行多方案比选，在满足屏蔽安全要求的情况下，重量最轻、占用空间最小的方案就是最优化的方案。

## 1.3 放射性包容设计

1.3.1 组成与功能 放射性包容是控制辐射源的放射性物质外逸的主要手段。所谓放射性包容就是将放射性物质密封在一定范围内，防止其泄漏或释放到该范围以外的地方。核动力舰船的放射性包容通常有 3 道实体屏障，第 1 道是燃料包壳；第 2 道是反应堆压力容器（RPV）和一回路系统；第 3 道是堆舱。燃料包壳就是包容反应堆燃料芯块的套管，旨在将燃料裂变产生的放射性物质包容在其中，阻止堆芯放射性物质泄漏进入反应堆冷却剂中；RPV 和一回路系统将反应堆冷却剂全部包容在内，阻止冷却剂中的放射性泄漏到反应堆堆舱；反应堆堆舱将反应堆和一回路系统的主要设备和管道包容在内，当放射性物质由反应堆一回路系统外逸到堆舱以后，它能阻止其泄漏到堆舱以外的环境中去，是确保舰员和舰上环境安全的最后一道防线。

## 1.3.2 放射性包容有效性控制与优化

### （1）燃料元件破损当量控制要求

燃料元件零破损是设计制造运行过程追求的目标，但现实存在发生破损的可能性。通常，反应堆正常运行允许有一定的燃料元件破损，但当破损数量超过一定限度时，可能威胁核安全和辐射安全。破损当量控制若过于严格，可能造成巨大资源浪费，并影响战斗力；若过于宽松，又可能面临核安全风险。因此，破损当量控制要求是辐射安全设计的重要内容之一，其设计务必科学合理。

### （2）反应堆一回路压力边界泄漏控制要求

反应堆一回路系统长期在高温高压下工作，难免出现“跑冒滴漏”，保证压力边界绝对密封其代价也是不可承受的，所以通常允许一回路压力边界有一定的泄漏；但若泄漏超过某个限度时，可能危及反应堆安全。因此，一回路压力边界泄漏控制要求是包容设计的重要技术指标，对其进行有效监测也是辐射安全设计必需考虑的问题。蒸汽发生器传热管是一回路压力边界的重要组成部分，因此，其泄漏控制要求和监测手段也不容忽视。

### （3）堆舱密封性要求

反应堆正常运行时，堆舱处于负压状态，具有很好的密封性。但当发生冷却剂丧失事故（LOCA）等严重事故时，堆舱负压瞬间消失，堆舱内温度和压力不断升高，将造成堆舱内放射性物质不断向邻舱泄漏，当泄漏率达到或超过一定限度时，舰船工作人员辐射安全将受到威胁，甚至危及生命安全。因此，在某些事故工况下，堆舱内必需有足够的密封性，这是确保工作人员安全的最后一道防线。所以，堆舱密封性设计和包容失效判定技术也是辐射安全设计中不可或缺的重要内容。

## 1.4 辐射分区

1.4.1 构成与功能 为便于辐射防护管理和舰员受照剂量控制，涉核场所通常进行辐射分区。辐射分区是核舰船辐射安全管理的基本依据和重要保障，是设计阶段必须考虑的问题，且必需与总体设计同步开展。舰船在总体设计时，应明确涉核区域和非涉核区域的界限。根据国际原子能机构相关规定，涉核工作场所通常分为控制区和

监督区。需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域通常划分为控制区，以保证正常工作条件下正常照射或防止放射性污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射的范围。将涉核区域内未被划定控制区的区域定为监督区，监督区不需要采用专门的辐射防护手段或安全措施，但需要对工作环境的辐射水平和污染水平进行监测控制，对工作人员的受照情况进行监督和评价。

1.4.2 设计统筹 为便于管控，涉核区域一般相对集中，而且范围越小越好。辐射分区设计需与总体设计、屏蔽设计、废物处理系统等统筹协调。涉核区域设置出入口，由于舰船空间资源宝贵，采用实体边界划定控制区不现实，可采用其他手段进行标示。出入口应设置醒目的标示。控制区内，不同区域的辐射水平或污染水平可能变化较大，需要采取的防护手段与安全措施也可能不同，为方便管理和有效控制人员受照剂量，还可将控制区划分子区，设定为严格控制区和控制区。控制区还应合理组织气流走向，尽量保证空气由低污染区向高污染区流动；高污染区气流走向无法控制时，应设置相对隔离或密闭措施。合理规划人员通行路线和物流路线，避免涉核区域与非涉核区域交叉、控制区与监督区互相交叉。放射性流出物排放口和排放管路应设置在涉核区域内。

## 1.5 放射性废物处理系统

1.5.1 系统组成与功能 废物处理系统主要用于收集、暂存和排放来自反应堆一回路系统的放射性气体、液体和固体，包括3个分系统：气态废物处理和排放系统；液态废物收集和排放系统；固体废物收集和暂存系统。

在堆舱和其他涉核区域设置气态废物处理和排放系统，以尽量减少堆舱气体向外泄漏和迁移，有效滤除工作场所空气中的放射性污染，降低工作人员内照射剂量；并将滤除后的空气通过排风口排到舰船外。液态废物收集和排放系统主要用于收集和排放舰船产生的废水。废离子交换树脂也属于液态废物，舰船上应设置独立的收集和排放系统。固体废物收集和暂存系统主要用于收集和暂存进堆舱应急抢修产生的放射性固体废物，主要有更换下来的零部件、报废的器具、检修过程用过的擦拭物（如抹布、棉纱等）以及人员穿过的防护用品等。

1.5.2 废物处理系统与其他设计的统筹 废物处理系统设计应与总体设计、辐射分区设计等同步开展、统筹协调。首先是与辐射分区的统筹，废物处理系统应布置在涉核区域以内，包括所有管路和设备等。如果排放管路无法控制在涉核区域内，应避免人员密集区，并做好标示或警示。废液和固体废物收集装置应设置在控制区。其次是与总体设计的统筹，气态废物处理系统和液态废物排放系统均应与总体设计同时进行，并合理设置排放管路和排放口，排放口应尽量设置在舷外低位处，防止气态废物重新回流到舰船上，污染工作环境。

关于废物处理系统的建设规模是一个值得论证的问题。建立一个像陆上三废处理设施那样功能齐全的废物处理系统是没有必要的，舰船上资源也是不允许的。

## 1.6 辐射监测系统

1.6.1 基本组成和功能 辐射监测的目的是对“辐射源”控制措施的有效性进行监控，是监督辐射安全状况的必要手段，是辐射安全与防护的“眼睛”。为保证核动力装置运行安全、舰员辐射安全和舰上环境安全，核动力舰船辐射监测应包括：工艺辐射监测、舱室环境辐射监测和个人剂量监测（在个人防护系统中讨论）3个方面。监测方式包括固定在线式、便携式或移动式以及取样分析式，3种方式互为补充，以便及时掌握辐射水平变化和发现异常，防止事故发生或发展。工艺辐射监测就是采用辐射监测手段对重要系统设备的运行安全进行监控，3道实体屏障和辐射屏蔽是反应堆运行安全和人员辐射安全的重要保障，因此是实时监控的重要对象。根据需要，还可对其他重要设备进行监控。舱室辐射监测的目的是掌握工作场所辐射水平变化，及时发现辐射异常。舰船涉核场所应设置固定式连续在线监测设备，同时配备便携式仪器和适量实验分析设备，3种方式互为补充，用于监测包括堆舱在内的涉核区域的辐射安全。

1.6.2 辐射监测优化与设计统筹 理论上，辐射监测项目设置的越全面越好，在线监测布点越多越好，但这无疑将占用舰船更多的空间，是很不现实的，因此应对3种监测方式的配置进行统筹考虑。在线监测系统的监测内容、布点和设备布

局等，需在统筹考虑辐射屏蔽设计、放射性包容设计和辐射分区特点的基础上进行优化，既要达到辐射安全监控的有效性，又要尽量少占用舰上资源。针对同一监测对象，不宜配置多种监测手段，应选择最有效的手段。同一台监测设备可考虑承担多种不同的监测任务。实验分析设备通常占用空间大，应适量配备。值得注意的是，监测报警阈值是辐射安全设计的重要内容，不可轻视更不能忽视。

## 1.7 个人辐射监测与防护系统

### 1.7.1 基本组成和功能

#### (1) 个人剂量监测

个人剂量是评价涉核工作人员辐射安全的重要依据，包括外照射剂量和内照射剂量。舰员日常工作和维修期间，受照剂量主要来自外照射。舰上重要岗位，应配备 2 种不同的外照射剂量监测手段（直读式和非直读式）。电子剂量报警仪作为直读式监测手段主要用于进堆舱抢修用，非直读式的热释光或光致光剂量仪主要用于日常工作使用。反应堆正常工作期间，工作场所几乎没有放射性污染，舰员内照射剂量可忽略；另一方面，内照射剂量监测相对复杂，设备体积大，占用空间多，因此不建议舰上配备内照射监测设备。

#### (2) 个人防护

个人防护包括外照射防护和内照射防护。内照射防护是由摄入体内的放射性造成，因此控制内照射剂量有效措施是切断吸入和食入途径。戴口罩或呼吸面具可大大降低内照射剂量，因此舰上应针对不同的应用场景配备不同的呼吸用具。还需适量配置防护服、防护鞋和脚套等，其对防护皮肤外照射比较有效，但对强辐射场防护作用不大。应在堆舱附近设置洗消通道，便于维修人员更衣淋浴，以防止污染扩散，降低人员受照剂量。

1.7.2 个人防护与其他系统之间的统筹 必要时，个人受照剂量可以借助舱室辐射监测数据进行计算，特别是当监测个人内照射剂量比较困难时，可通过监测舱室空气中污染核素活度浓度的方法来推算，这是一种比较可信的手段。舰船工作人员的个人防护和剂量管理与舰船的辐射分区密切相关，应在涉核区域的出入口设置剂量管理系统，工作人员采用刷卡方式进入和离开涉核区域，确保工作人员剂量的有效管理。由于堆舱辐射场能量相对较高，进堆舱的抢修防护服对外照射防护几乎不起作用，最有效的防护方法还是时间控制法，因此辐射分区设计应明确进堆舱抢修的相关控制要求。

## 2 结束语

辐射安全是战斗力的保障，但辐射安全体系占用舰上资源过多将降低战斗力性能，因此辐射安全最优化设计是核动力舰船设计必需面对的重要问题，甚至关系舰船设计的成败。最优化的辐射安全设计是一项系统工程，不仅需要协调体系内部关系，还需要统筹与其他系统甚至整个舰船的关系，同时，需充分考虑可利用的外部条件，并且要经历持续反复迭代过程，对多种可选方案进行比对分析，只有这样，才能实现既达到最佳的辐射安全水平，又保持最好的战斗力水平。

### 参考文献：

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局发布. 电离辐射防护与辐射安全基本标准 :GB18871—2002[S]. 北京：中国标准出版社，2002.
- [2] 国际放射防护委员会（ICRP）. 国际放射防护委员会 2007 年建议书（103 号报告）[M]. 北京：原子能出版社，2008: 91.

（责任编辑：刘 君）