

海上核能：监管融合与安全实践的深度解析

随着全球能源转型的加速，核能作为一种清洁、高效的能源形式，其在商业航运和海上设施中的应用潜力日益受到关注。然而，将核能技术引入移动的海洋环境，不仅是一项技术革新，更是对现有监管体系的一次深刻挑战。它要求跨越海事与核能两大传统上独立的监管领域，构建一个全新的、协调一致的安全框架。



本文将基于劳氏船级社（LR）发布的《海上核能指南》（*Navigating nuclear energy in maritime*），重点梳理从监管框架对齐到具体实施要求的核心内容，旨在为我国核安全监管机构及相关技术单位提供一份详实的参考资料。

监管框架的融合：挑战与路径

要实现核能的海上应用，首要面临的挑战是海事监管与核能监管两大体系的差异与融合。海事监管以国际海事组织（IMO）为核心，其法规（如《国际海上人命安全公约》SOLAS）旨在保障船舶航行安全、防止海洋污染，并适应船舶跨国界、高流动性的特点。而核能监管则以国际原子能机构（IAEA）的安全标准为基石，通过各国国家核监管机构（NNR）实施，其核心是确保核设施在固定场址内的核安全、核安保与核保障（即“3S”），防止放射性物质泄漏和核材料扩散。

这两种监管体系在设计理念、风险容忍度和执行方式上存在显著差异，为海上核动力装置的监管带来了复杂性。

（一）指令导向与目标导向的协调

指令导向（Prescriptive Approach）：这是传统监管的主要方式，通过制定详细、具体的技术规范 and 标准来确保安全。例如，海事领域对船体结构、设备配置有明确规定；核能领域对反应堆设计、建造也有成熟的规范。其优点是清晰、易于执行，但缺点是灵活性不足，难以适应新技术或新应用场景。

目标导向（Goal-based Approach）：面对新技术（如小型模块化反应堆 SMR）和新应用（如海上移动平台），指令导向的局限性凸显。目标导向方法应运而生，它不规定具体

技术路径，而是设定必须达到的顶层安全目标（Goals）和功能要求（Functional Requirements），由设计方通过工程分析和风险评估来证明其方案能够达到“等效安全水平”。

为了融合两大体系，采用“指令导向”与“目标导向”相结合的混合模式是业界共识。对于成熟的、标准化的部件和系统，可沿用指令导向以简化流程；对于涉及系统集成、新型反应堆技术等创新部分，则采用目标导向方法，通过严谨的安全论证来满足监管要求。

（二）风险管理原则的对齐

海事与核能领域都采用风险管理的理念，但其核心原则的表述和应用存在差异，需要进行协调统一。

原则	应用领域	核心内涵
ALARA (As Low as Reasonably Achievable)	核能（辐射防护）	辐射照射应保持在“合理可行的低水平”，强调在考虑社会经济因素后，持续优化以降低辐射风险。
ALARP (As Low as Reasonably Practicable)	核能 / 工业安全	风险应降低到“最低合理可行”，通过成本效益分析，证明进一步降低风险的成本与所获安全效益严重不成比例。
FSA (Formal Safety Assessment)	海事（IMO）	一种结构化、系统化的风险评估方法，用于评估与船舶设计、操作相关的风险，并为决策提供依据，其理念与ALARP相似。

（三）监管角色的明确与协同

实现有效监管的关键在于明确各监管方的角色并建立高效的协同机制。

国家海事主管机关（Flag State）与 NNR：两者必须建立紧密的合作关系。海事主管机关负责船舶整体的航行安全、防污染等，而 NNR 则专注于反应堆本身的核安全、核安保和核材料管制。双方需要通过书面协议明确责任划分、信息共享和联合审查机制。

船级社（Classification Societies）的角色延伸：船级社作为独立的第三方技术机构，在海事领域扮演着“被认可组织”（RO）的角色，受船旗国委托执行法定检验和发证。在海上核能领域，一个前瞻性的构想是，船级社可以将其技术专长延伸至核安全监管领域，作为 NNR 的“核能 RO”，承担部分非核心核安全系统的检验、认证和监督工作，从而帮助 NNR 克服资源限制，实现更有效的全球监管覆盖。

实施核能海上应用的核心要求

在明确了监管融合的路径后，具体实施海上核能项目需要满足一系列涵盖技术、安全、安保、运营等多维度的严格要求。

（一）海事与核能技术的系统集成

技术集成的核心在于按安全等级进行系统整合。核能行业通过概率安全分析（PSA）等方法，将结构、系统和部件（SSC）按其对核安全的重要性进行分级。海事行业也有类似的关键设备（SCE）概念。

当两者结合时，项目团队必须清晰界定：

接口管理：明确核系统与船舶系统（如电力、冷却、控制）的物理和功能接口。

标准适用：确定哪些设备需要满足核级质量标准，哪些船舶系统需要满足核安全相关要求。例如，为反应堆提供应急冷却的海水泵，其可靠性要求将远高于普通船舶水泵。

审批权限：明确不同系统和部件的设计、制造、安装应由海事主管机关还是 NNR 审批。

这一过程是迭代的，需要项目团队与两大监管机构持续沟通，以解决可能出现的标准冲突或监管空白。

（二）核安全论证的开发

核安全论证（Nuclear Safety Case）是向监管机构证明设施在整个生命周期内风险可控的核心文件。对于海上核动力装置，安全论证需特别关注以下方面：

1. 环境考量：海洋环境对反应堆安全构成独特挑战，必须在安全论证中予以充分评估。

（1）风浪与运动：船舶在风浪中会产生六自由度的复杂运动（横摇、纵摇、垂荡等），这会影响反应堆冷却剂的自然循环、控制棒的插入以及仪表的读数。必须通过模型试验和计算分析，证明在所有设计海况下，反应堆都能安全运行或安全停堆。

（2）腐蚀与生物附着：高盐、高湿的海洋环境会加速设备和结构的腐蚀。同时，船体水下部分的生物附着（如贝类）会增加阻力，影响冷却水进水口的流量。材料选择和防腐设计至关重要。

（3）地震与海啸：即使在公海，近海或海底断层的地震

也可能对船舶造成影响。安全论证需考虑地震载荷对反应堆及其支撑结构的影响。

2. 放射性废物管理：船上必须设计安全、可靠的系统，用于临时贮存运行产生的放射性废物和乏燃料（SNF），直至其能被转移至陆上许可的设施进行处理。这涉及到废物分类、屏蔽、冷却和安保等多个方面。

3. 热污染：反应堆运行和停堆后都需要大量冷却水。向海洋排放的温水可能对局部海洋生态造成影响，需要进行环境影响评估，并可能需采取措施控制温升。

（三）核安保与核保障的考量

核能的和平利用必须伴随着严格的安保与保障措施，防止核材料被盗、被破坏或被转用于军事目的。

1. 核安保：关注防范蓄意的恶意行为。

（1）设计基准威胁（DBT）：必须为海上核动力装置制定专门的 DBT，明确需要防范的威胁类型、攻击者数量、武器装备和战术。由于船舶会停靠不同国家的港口，DBT 的制定需要国际协调。

（2）安保系统组成：包括实体保护系统（PPS，如围栏、门禁、监控）、网络保护系统（CPS，保护数字化控制系统免受网络攻击）和内部人员威胁缓解措施（如人员背景审查、行为监测）。

2. 核保障：关注履行国际防扩散法律义务。

（1）核材料衡算与控制（NMAC）：必须建立一套可靠的系统，对船上所有受保障的核材料（如新燃料、乏燃料）进行实时跟踪、计量和记录，确保其不被转用。

(2) 核查与监督：需要为 IAEA 的监督员提供便利，使其能够在船舶停靠港口或位于国际水域时，对核材料进行核查。这可能需要开发远程监测、无人机视察等创新技术。

(四) 运营层面的准备

成功的运营离不开周密的准备，涵盖人员、应急响应和供应链等各个方面。

人员资质：船员不仅要满足《海员培训、发证和值班标准国际公约》(STCW) 的要求，还需接受专门的核动力装置操作、辐射防护和应急响应培训。培养“合格的、有经验的和称职的人员”(SQEP) 是运营安全的基石。

应急响应：海上应急响应面临距离远、外部支援慢、环境动态变化等挑战。必须制定详尽的应急预案，明确在不同海域（领海、公海）发生事故时，船方、船旗国、沿海国以及国际组织之间的协调机制。

上下游服务：需要建立完整的产业生态链。上游要确保核燃料的稳定供应和运输。下游要规划好在指定港口进行反应堆维护、换料以及最终的退役(D&D)和废物处理。这可能需要在特定区域建设具备核设施运营资质的船厂或码头。

质量保证：必须建立一个覆盖设计、采购、建造、运营、维护直至退役全生命周期的质量保证(QA)体系，确保所有活动都符合既定的标准和程序，特别是对于核级设备和材料的可追溯性。

(五) 保险与责任框架

保险是项目经济可行性的关键，但目前海上核能应用在此方面存在巨大空白。

现有的海事责任公约（如《海事索赔责任限制公约》LLMC）通常将核损害排除在外。而陆上核责任公约（如《维也纳公约》《巴黎公约》）又不适用于移动的船舶。1962年的《核动力船舶经营人责任公约》（布鲁塞尔公约）因未被广泛批准而未能生效。这导致目前海上核动力船舶面临“无全球性责任限制”的困境。由于责任框架不明确，商业保险公司难以对核风险进行定价和承保。船东互保协会（P&I Clubs）的规则通常也明确排除核风险。

要实现商业保险的可获得性，首要任务是建立一个清晰、可预测的全球性责任和赔偿框架，明确运营人的严格责任、强制保险要求以及责任限额。在此之前，项目可能需要依赖有限的商业保险和政府担保相结合的方式。

结语

核能海上应用的未来充满希望，但道路曲折。它不仅需要反应堆技术的成熟，更依赖于一个跨领域、跨国界的监管合作新生态的建立。通过深入梳理和协调海事与核能两大体系的要求，在安全论证、安保保障、运营准备和责任保险等方面形成清晰的实施路径，我们才能稳步推动核能安全、可靠地服务于蓝色经济。

对外交流合作部 余少青 供稿

编译自劳氏船级社官网

文章内容不代表本公众号观点