

美国与加拿大先进反应堆监管方法对比研究

一、前言

2021年8月，美国核监管委员会（NRC）和加拿大核安全委员会（CNSC）联合编制并发布《先进反应堆的技术包容与风险指引型审查：美国许可现代化项目与加拿大监管方法对比》技术报告，对两国在先进堆监管方面的技术实施细节进行了详细对比。



Technology Inclusive and Risk-Informed Reviews for Advanced Reactors: Comparing the US Licensing Modernization Project with the Canadian Regulatory Approach



+

图 1. 美国 NRC 与加拿大 CNSC 联合编制的《先进反应堆的技术包容与风险指引型审查：美国许可现代化项目与加拿大监管方法对比》技术报告

二、报告背景情况

该报告主要横向对比**美国许可现代化项目(LMP,行业主导开发、NRC予以认可的技术包容-风险指引型-基于安全业绩的先进堆审评方法论,为10 CFR Part 53法规最核心的技术前身)**与加拿大**以反应堆供应商设计审查(VDR,CNSC面向反应堆本体、独立于厂址的可选付费预许可技术审评)**为特色的先进堆监管体系,研究范畴覆盖**预许可机制、正式许可路径、安全目标、基础安全功能、事件分类、安全分析方法、构筑物、系统与部件(SSCs)分级、纵深防御、概率风险指标**等关键维度,并据此提出未来双边监管合作的工作建议。

报告设有如下三大工作目标:

- 梳理美加监管方法和技术指南的异同;
- 为申请方和监管审查人员提供技术参考;
- 促进双方相互借鉴审查成果、提升联合技术审查能力。

需要注意的是,该报告仅开展技术方法层面对比,不涉及两国法律与政策差异。报告本身也不具备法律效力,即便技术方法存在大量共通点,但两国监管机构仍然保留独立监管决策权力。

三、报告核心内容

（一）美加预许可流程对比

1.加拿大预许可流程

加拿大的反应堆供应商设计审查（VDR）是加拿大核监管文件 REGDOC-3.5.4 中描述的可选预许可流程，供应商/设计方可通过与 CNSC 签署服务协议来开展。

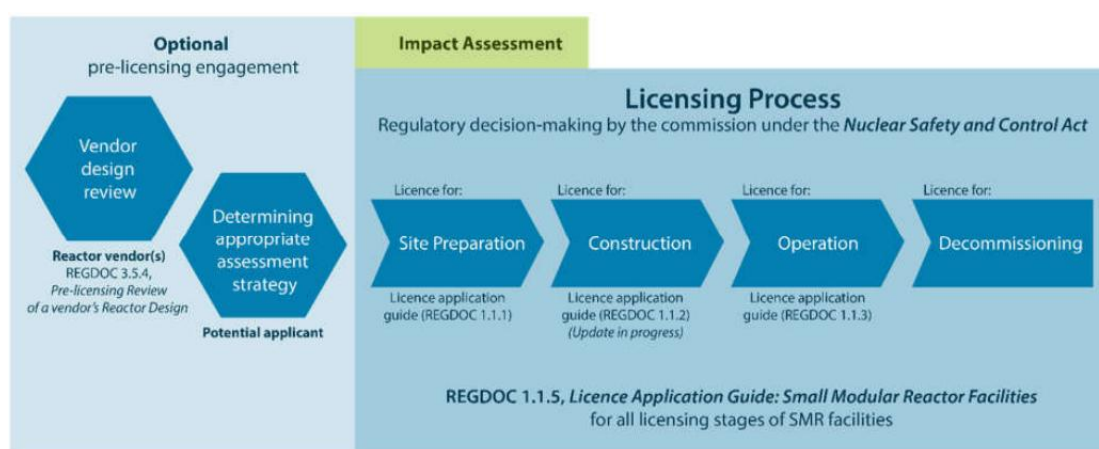


图 2. 加拿大 CNSC 许可与预许可全流程图

VDR 分为三个阶段：

- 第一阶段：评估供应商提交的设计信息，确认设计流程是否总体上满足 CNSC 设计要求；
- 第二阶段：开展更详细的审查，重点识别是否存在潜在的颠覆性许可障碍；
- 第三阶段：在建造申请提交前，针对前两个阶段覆盖的重点领域进行深入审查。

第一、二阶段涵盖的 **19** 个设计审查重点领域包括：

- 电厂总体描述、纵深防御、安全目标和剂量验收标准
- 构筑物、系统和部件（SSCs）分类
- 反应堆堆芯设计
- 燃料设计与资质认证
- 控制系统与设施
- 停堆手段
- 堆芯应急冷却和应急排热系统
- 安全壳/包容体和重要土建结构
- 超设计基准事故（BDBAs）和严重事故（SA）预防与缓解，
包括设计扩展工况（DECs）
- 安全分析（确定性安全分析、概率安全分析）及内外部灾害
- 压力边界设计
- 防火
- 辐射防护
- 堆外临界

- 稳健性、核安保与核保障
- 供应商研发计划
- 设计过程管理体系与安全管理中的质量保证
- 人因工程
- 将退役纳入设计考量

此外，加拿大还设有与 VDR 并行的**申请评估策略（Application Assessment Strategy）**，与 VDR 主要针对堆型设计不同，申请评估策略主要面向投资方/未来许可申请方，针对的是绑定潜在厂址、项目组织模式、全生命周期许可活动的完整拟建项目。该策略主要是帮助投资方理清整套许可路径、监管文件清单、持证人法律义务，为后续正式许可申请制定整体评估策略等。申请评估策略共分为 4 个活动步骤，涵盖 **14 个安全与控制领域（SCAs）**，其中包括管理系统、人因绩效管理、运行性能、安全分析、物理设计、适用性、辐射防护、常规健康与安全、环境保护、应急管理、防火、废物管理、安保、保障与不扩散、包装与运输等。

VDR 与申请评估策略均为可选预许可沟通机制，二者相互独立，均无法律效力，但预许可反馈文件可作为正式许可阶段的审查参考材料，但不能代替法定许可结论。

2.美国预许可流程

美国 NRC 没有像加拿大 VDR 那样一套固定命名、分阶段的标准
化预许可审查流程,而是提供一整套多元、可选的预申请交互工具包,
均属于非正式/半正式预申请活动,均不具备法定许可效力,审查反
馈、专题报告结论不能替代正式法规下的许可审批(但可作为正式许
可阶段的审查参考材料)。预申请交互主要形式包括:项目意向函、
各类专题会议、白皮书、技术报告、专题报告、监管参与计划
(Regulatory Engagement Plan, REP)、预申请安全评价报告等;2017
年 12 月 NRC 发布《非轻水反应堆监管审查路线图》,系统梳理了上
述全部预申请沟通方式。

美加两国的预许可制度均可用于早期识别设计障碍,减少正式许
可阶段风险。但预许可结论不能绕过本国法定审批流程。

(二) 美加许可流程对比

1. 加拿大许可流程

加拿大核设施法定许可流程分为四个阶段:

- 场地准备许可证 (LTPS): 开展厂址评估、环境影响评估等
相关活动,可不依赖完整反应堆详细设计;
- 建造许可证: 申请人需提交初步安全分析报告,方可开展现
场建造活动;

- 运行许可证：完成建造与调试后提交申请，一般设置控制点，完成规定试验后方可正式运行；

- 退役许可证：用于项目寿期末开展退役相关作业。

许可审查由 CNSC 的多学科技术团队承担；许可基础（Licensing Basis）由三部分构成：适用法律法规的监管要求、许可证载明的许可条件、许可申请及支撑文件中的安全控制承诺。VDR、申请评估策略等预许可输出材料仅可作为审查参考，不能替代法定许可审查程序。

2026 年 2 月更新发布 REGDOC-1.1.5 V1.1, 进一步细化分级方法，允许针对微堆等风险较低项目，按照风险大小，成比例缩减文档深度、审查范围。加拿大没有专门为微堆单独创设一套全新法定许可流程，微堆依然执行上述四阶段许可框架。微堆同样可以采用 VDR、申请评估策略两套可选预许可工具开展前期沟通。

2.美国许可流程

美国 NRC 在 10 CFR 法规框架下提供多条并行可选法定许可路径，分别归属 Part 50、Part 52 和 2026 年 5 月发布的 Part 53，各路径可独立选用：

- 建造许可证（CP）：10 CFR Part 50，两步式许可，批准现场建造；

- 运行许可证：10 CFR Part 50，建设完成并满足全部前置条件后获批，授权机组运行；

- 设计认证（DC）：10 CFR Part 52，脱离具体厂址，对反应堆通用设计开展审查认证；

- 早期场地许可（ESP）：10 CFR Part 52，单独对厂址开展审查，与堆型解耦；

- 联合许可证（COL）：10 CFR Part 52，整合建造许可与有条件运行许可；

- 标准设计批准（SDA）：10 CFR Part 52，对设计模块输出标准的设计审查，不等同于设计认证；

- 制造许可证：10 CFR Part 52 Subpart F，支持反应堆异地工厂制造，后续转运至项目厂址。

所有法定许可申请均需要履行原子安全与许可委员会（ASLB）听证程序，同时开展《国家环境政策法》（NEPA）要求的环境评估；各类预申请产出（专题报告、预申请安全评价报告等）不能绕开法定

审批流程。

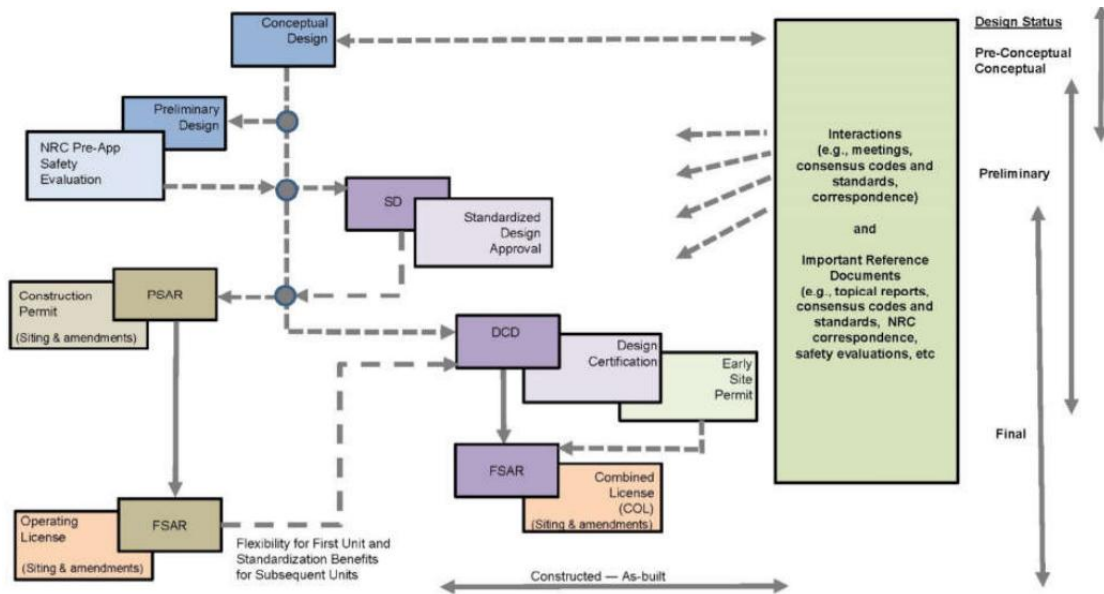


图 3. 美国 NRC 非轻水堆许可流程

（三）美加先进堆具体监管方法对比

除许可流程和正式许可流程外，该报告还从安全目标、基础安全功能、事件分类、安全分析方法、构筑物、系统与部件（SSCs）分级、纵深防御、概率风险指标等七个维度展开对比。

定性安全目标

两国均采用相似的高层次定性安全目标，要求：

- 核电运行不能给公众带来显著额外生命健康风险；
- 核电带来的社会风险相较于其他可行的发电技术，不显著增加其他社会风险。

即高频事件后果要轻微，严重后果事件发生概率必须极低。

定量安全指标

虽然两国定性安全目标基本一致，但双方选用的定量安全指标不同。美国 NRC 的 LMP 框架主要采用**定量健康目标（QHO）**，直接约束厂址周边人群的早期死亡、迟发癌症的个体风险数值：隔离边界 1.6 公里内早期死亡个体风险 $\leq 5 \times 10^{-7}$ /电站·年；16 公里范围内潜在癌症死亡个体风险 $\leq 2 \times 10^{-6}$ /电站·年，需要开展三级 PRA 直接计算剂量后果。而加拿大 CNSC 则采用**堆芯损坏频率（CDF）、小规模释放频率（SRF）、大规模释放频率（LRF）**这一套基于放射性释放的指标，依靠一级、二级 PSA 开展评价：CDF $\leq 10^{-5}$ /堆·年；SRF（碘-131 释放 $>10^{15}$ Bq） $<10^{-5}$ /堆·年；LRF（铯-137 释放 $>10^{14}$ Bq） $<10^{-6}$ /堆·年，无直接针对人群死亡风险的定量指标。

基础安全功能

两国对先进堆的基础安全功能的要求本质相同，都是把反应性控制、余热排出、放射性包容作为三大根本安全功能，只是在文档表述、拆分附属功能（如辐射屏蔽、运行排放控制、安全参数监测等）上存在文字差异，不存在理念分歧。

事件分类

两国均以事件发生频率作为核心依据，将事件划分为预期运行事件（AOO）、设计基准事件（DBA/DBE）、超设计基准事件（BDBE/BDBA）。但统计口径、频率阈值、剂量验收准则存在差异：

- 统计口径上,美国按**每电站每年**统计(适配 SMR 多模块电站);
加拿大方面则按**每反应堆每年**统计;

- 频率划分上, 加拿大: $AOO \geq 10^{-2}/\text{堆} \cdot \text{年}$; $10^{-5} \leq DBA < 10^{-2}/\text{堆} \cdot \text{年}$; $BDBA < 10^{-5}/\text{堆} \cdot \text{年}$; BDBA 无明确频率下限。美国: $AOO > 10^{-2}/\text{电站} \cdot \text{年}$; $10^{-4} \leq DBE < 10^{-2}/\text{电站} \cdot \text{年}$; $5 \cdot 10^{-7} \leq BDBE < 10^{-4}/\text{电站} \cdot \text{年}$ 。

- 剂量限值上, 加拿大的 AOO 剂量为 0.5 mSv, DBA 剂量为 20 mSv; 美国的 AOO 剂量则为 1 至 10 mSv, DBE 剂量为 10 至 250 mSv, BDBE 剂量为 250 至 7500 mSv; 美国 LMP 给出的上述剂量区间属于频率 - 后果 (F-C) 目标曲线的风险显著性筛选参考工具, 不是法定强制依据。加拿大的剂量则为确定论安全分析的硬性验收准则。

- 边界模糊事件处理方面, CNSC 将频率落在边界、不确定性大的事件归入更高频率等级开展完整分析, 禁止为了降频率而人为拆分事件。NRC 则要求若实践 5%—95% 频率不确定区间跨分类阈值, 则同时归入全部跨越的事件类别分别开展评估。加拿大设置设计扩展条件 (DEC), 美国虽没有明确 DEC, 但 BDBE 承担同等功能。

安全分析

两国都同时使用确定论安全分析 (DSA) 和概率安全分析, 分析中评估 DBA 时, 均只采信安全相关 SSC 的缓解能力, 采用保守假设, 计算事件后 30 天厂区边界受照剂量后果。

- 加拿大：DBA 分析强制使用保守假设，包含单一故障、最坏初始工况、保守操作员动作时间；DEC 分析可采用最佳估算程序；要求 PSA Level 1+Level 2。

- 美国：DSA 主要服务 DBA 分析；创新采用频率 - 后果 (F-C) 目标曲线作为风险显著性判别工具；强制 Level 3 PRA，直接输出厂址边界剂量。NRC 认为，在完成完整的许可基准事件 (LBE)、PRA 与纵深防御评估且充分论证的前提下，可以豁免单一故障准则，并非笼统替代全部确定论保守要求。

构筑物、系统和部件 (SSCs) 安全分级

两国均遵循先开展功能分析，再实施设备分级的逻辑，综合考虑安全功能、失效后果、调用概率、响应时间等要素。

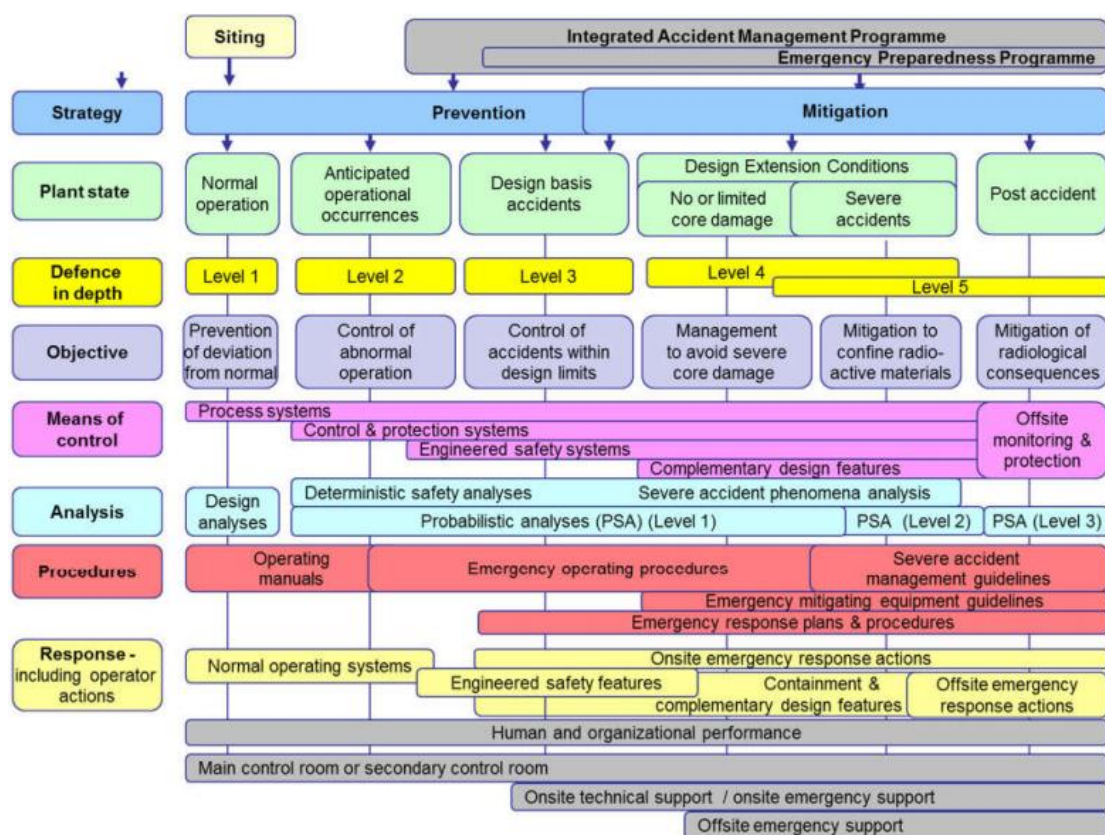
- 美国给出明确的三分类：安全相关 (SR)、非安全相关但需特殊对待 (NSRST)、非安全相关且无需特殊对待 (NST)。明确定义风险显著、安全显著部件的范围。

- 加拿大仅强制区分“安全重要和非安全重要”，不强制固定子类数量，允许申请人结合论证自行细化分级；使用 FV (Fussell-Vesely)、RAW (Risk Achievement Worth) 等重要度指标筛选高风险设备，采用分级适配的质保与设计要求。

纵深防御 (DiD)

总体理念均参考 IAEA 的多层纵深防御框架，覆盖设计、程序、管理程序全维度，但在单一故障准则的执行上存在关键差异。

- 加拿大：完整采用 5 层纵深防御体系；单一故障准则适用于 AOO、DBA（纵深防御第 3 层级）；豁免属于特例，必须充分书面论证；BDBA/DEC 分析可不执行单一故障准则。



- 美国：不采用固定的 5 层体系，而是分为“设备能力纵深防御”和“程序性纵深防御”两大模块；依靠完整 LBE、PRA 与 DiD 综合评估，在满足论证前提下，可以豁免传统单一故障准则，允许使用 NSRST 部件作为 SR 部件的后备。

概率风险指标与 PRA/PSA 实践

- PRA/PSA 范围：美国强制 Level 3 PRA，覆盖全部辐射源、内外部灾害、全部运行模式。加拿大强制 Level 1、Level 2 PSA，不强制 Level 3。

- 风险重要度：美国同时支持相对风险、绝对风险重要度指标。加拿大只使用 FV、RAW 等相对风险重要度指标。

- 累积风险评价：美国增加全厂累积剂量风险指标，所有 LBE 造成厂区边界超过 1 mSv 的总频率 ≤ 1 次/电站·年。加拿大没有该全厂累积剂量指标，依靠 SRF、LRF 两个释放频率指标约束累积风险。

四、总结及后续

总结

《先进反应堆的技术包容与风险指引型审查：美国许可现代化项目与加拿大监管方法对比》是全球先进堆监管领域一份标志性双边技术报告。该报告不仅系统梳理美加两套先进堆监管体系异同，论证了审查成果互鉴、联合技术审查的可行性；同时还作为重要前置研究，为美国把 LMP 理念转化为成文法规提供跨国实践支撑。

后续

2024 年 10 月，美国 NRC 发布了《先进反应堆风险指引、技术包容监管框架》拟议规则，将 LMP 方法论正式编入法规。2026 年 4 月新的 10 CFR Part 53 正式发布，为先进反应堆提供可选许可路径。

截至目前，加拿大 CNSC 已完成多个 SMR 设计的 VDR，其中，BWRX-300 项目成为这份报告理念的工程试点，于 2025 年获批在加拿大达林顿厂址启动建造。

对外交流合作部 曾超 供稿
编译自美国核监管委员会官网
文章内容不代表本公众号观点