

美加核监管机构联合审查 BWRX-300 安全战略白皮书



BWRX-300 Small Modular Reactor

2022 年 12 月，GE 日立核能公司（GEH）向美国核监管委员会（NRC）和加拿大核安全委员会（CNSC）提交 BWRX-300 安全战略白皮书，请求两机构反馈意见。2023 年 7 月，两机构联合发布审查报告。本文对该报告作编译介绍。

一、审查背景

BWRX-300 是 GEH 开发的沸水堆型小型模块化反应堆，电功率约 300 兆瓦，采用轻水冷却和自然循环，配备非能动安全系统。该设计部分基于已获 NRC 设计认证的 1520 兆瓦经济简化沸水堆（ESBWR）。

美加两机构 2017 年签署谅解备忘录，2019 年签署合作备忘录，为先进反应堆和小型模块化反应堆技术审查建立合作机制。2022 年 4 月，美国田纳西流域管理局（TVA）与加拿大安

大略电力公司（OPG）宣布联合推进小型模块化反应堆在美加两国的开发与部署。TVA 拟在田纳西州克林奇河部署 BWRX-300；OPG 的达灵顿新建核电项目（DNNP）建造许可申请当时正在接受审查。同年 9 月，CNSC 与 NRC 签署专项合作章程，将安全战略列为联合审查议题。

白皮书对 BWRX-300 安全战略作总体说明，内容具有概括性，从高层次阐述相关监管要求与导则。两机构据此在安全原则、纵深防御、安全分析等层面开展审查，并分别对照本国监管要求提出意见。

二、CNSC 的审查意见

CNSC 总体认为，该战略与其法规要求和程序似乎一致：安全目标和纵深防御原则与 REGDOC-2.5.2《核电厂设计》相符，安全分析的范围、方法、假设始发事件选择、事件序列和验收准则，也大体符合 REGDOC-2.5.2《核电厂设计》、REGDOC-2.4.1《确定论安全分析》和 REGDOC-2.4.2《核电厂概率安全评价》的规定。但 CNSC 仍提出若干观察和澄清意见，主要集中在以下几方面。

- 关于风险指引、性能导向方法。白皮书声称采用风险指引、性能导向（RIPB）方法，但所述内容更接近传统的国际原子能机构（IAEA）方法。该方法虽考虑了风险，但通常难以称其为风险指引、性能导向方法。CNSC 认为，RIPB 方法应系统考虑并整合纵深防御、安全分析方法、风险重要性、

运行经验、工程判断、经工程验证的实践、可测性能目标等多种因素。

- 关于“实际消除”。白皮书提出，物理上不可能发生或频率小于 $1\text{E-}9$ /堆年的故障序列，被考虑予以“实际消除”。CNSC 指出，REGDOC-2.5.2 明确要求“实际消除”须经系统性方法论证，以高置信度证明其极不可能发生，不能仅凭概率截断值作判断。
- 关于防御线共用设备。BWRX-300 设置多条纵深防御线（DL2、DL3、DL4a、DL4b），部分传感器在 DL2 和 DL4a 之间共用。CNSC 要求 GEH 论证：当 DL3 被调用缓解某个与 DL4a 共用的 DL2 部件故障时，若 DL3 因共因失效失灵，DL4a 所需的安全功能仍应可用。该要求聚焦纵深防御的独立性：各防御线不得因共用设备而丧失独立功能。

CNSC 还提出，白皮书从 IAEA 标准 SSR-2/1《核电厂安全：设计》中选取了部分导则，但未说明选取标准及舍弃部分要求的原因，例如安全与安保、保障的接口、经工程验证的实践；“分级质保”“分级方法”“分级验收准则”中“分级”的含义需明确；白皮书未说明不确定性的处理、单一故障准则的落实和停堆有效性的证明方法。

三、NRC 的审查意见

NRC 表示，白皮书所述安全战略未完全满足 NRC 监管框架的全部要素，该框架以合理保证符合法规和充分保护公众健

康安全为指引。GEH 这一新颖方法有可能成功，但批准以申请人证明符合 NRC 法规为前提，包括对适用的豁免作出可接受的论证。意见主要集中在以下几方面。

- 事件分类与法规的关系。白皮书按故障序列频率划分事件类别，DL3 对应的基本安全功能，其故障序列频率在 $1\text{E}-2/\text{年}$ 至 $1\text{E}-5/\text{年}$ 之间。NRC 认为，数值阈值划分的事件类别可能与 10 CFR 第 50 部分要求考虑的设计基准事件不一致。例如，若反应堆冷却剂压力边界失冷频率低于 $1\text{E}-5/\text{年}$ ，按该逻辑失水事故（LOCA）将被划为超设计基准事故，似与 10 CFR 50.46 的要求不符，届时或需申请豁免。
- “安全相关”的认定。白皮书称“没有监管依据支持预期运行事件（AOO）必须由安全相关构筑物、系统和部件（SSC）缓解”。NRC 工作人员表示，无法确定这一方案如何满足 10 CFR 50.2 的要求。10 CFR 50.2 将安全相关 SSC 定义为设计基准事件期间或之后所依赖的构筑物、系统和部件，其功能包括保证反应堆冷却剂压力边界的完整性，以及停堆并将其维持在安全停堆状态。NRC 法规还规定，AOO 的安全停堆状态是指热量得到充分排出、并通过满足可接受燃料设计限值的裕度维持燃料完整性屏障的状态。
- 美国特定监管要求。白皮书似乎未涉及 10 CFR 50.155 超设计基准事件缓解，包括乏燃料池水位监测和补水能力；也未说明其安全战略如何满足 NRC 的环境方面要求，包括严重

事故缓解设计替代方案（SAMDA）的评估。IAEA 标准 SS R-2/1 本身涵盖安全与环境两方面内容。

- 定义与依据。白皮书似乎未界定安全等级、质量等级、抗震类别，仅对 DL2、DL3、DL4 指定安全等级和可靠性目标；不确定性的处理方式、事件类别数值阈值划分的技术依据均未展开。

四、两机构共识与分歧

两机构均未否定 GEH 的安全理念，意见集中在理念的落实方式。双方认为，未来提交材料应附路线图，说明如何满足各自辖区的监管要求，以及需要豁免的领域。此外，工作人员认为，如能附上安全战略各要素的实施范例，并说明 BWRX-300 安全战略与 GEH 为此前获 NRC 批准的设计（如 ESBWR）所用战略的异同，将便于审阅。两机构列出的待澄清事项包括：不确定性的处理、环境方面要求、各类事件验收准则、单一故障的纳入方式、风险指引、性能导向方法各要素的落实。

同时两机构的具体意见也各有侧重，对照如下：总体判断上，CNSC 认为该战略基本符合其监管要求，但需进一步深化，NRC 则认为其合规性尚需澄清；关于风险指引、性能导向方法，CNSC 指出白皮书未系统整合多种要素，NRC 要求该方法的应用符合委员会政策；关于事件分类依据，CNSC 反对仅凭概率截断值主张“实际消除”，NRC 认为数值阈值划分的事件类别可能与法规要求冲突；关于防御线共用设备，CNSC 要求论证共

因失效情形下 DL4a 安全功能的可用性，NRC 认为安全相关 SSC 的认定须有监管依据；审查基准上，CNSC 对照 REGDOC-2.5.2、REGDOC-2.4.1 和 REGDOC-2.4.2，NRC 对照 10 CFR 第 50、52 部分。

五、结语

联合报告记录了美加两机构围绕同一安全战略开展联合审查的过程与结果。报告结果可供供应商或潜在许可证持有者在今后与任一监管机构的讨论中参考，但对 CNSC 和 NRC 不具法律约束力。

对外交流合作部 张灵宇 供稿

编译自美国 NRC 官网

文章内容不代表本公众号观点