

美智库认为辐射防护不应无限加码： 改革 ALARA 所需的远不止 NRC 的提案

辐射防护是核能部署与产业发展的基础，但在实践中较少被公开深入探讨。在过去七十年间，以“线性无阈”（LNT）模型为科学基础、以“合理可行的低水平”（ALARA）为实践原则的辐射防护体系在全球范围内确立并沿用至今。随着全球核能复兴步伐加快，这套沿用多年的监管框架在美国正经历变革。

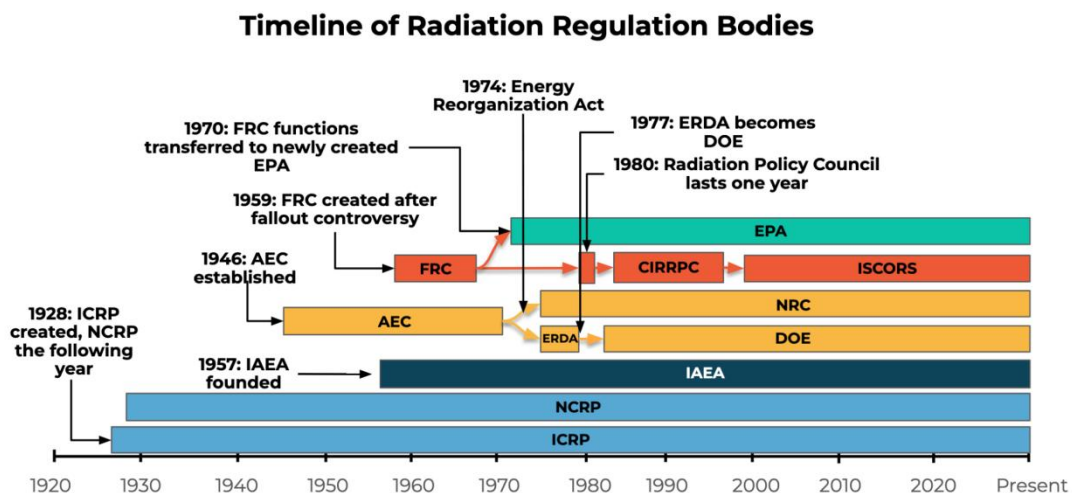


图 1.美国辐射防护监管机构历史沿革

2025 年 5 月 23 日，美国总统签署第 14300 号行政令《改革核监管委员会》，要求美国核监管委员会（NRC）全面修

订监管框架，并点名重新审视 LNT 模型和 ALARA 标准。作为落实举措，NRC 于 2026 年发布辐射防护框架改革拟议法规，拟以分级管理方法取代 ALARA。9 月 24 日，NRC 发布反应堆许可与监督制度全面改革拟议法规规则，并召开多场网络研讨会进行公开说明。围绕改革，美国突破研究所(BTI)除提交正式评论外，还发布了一份专题报告，系统回顾了美国辐射防护监管体系的形成过程。

改革动因

第 14300 号行政令将充沛的能源供应列为美国国家与经济安全的核心利益，提出到 2050 年将美国核电装机容量从 2024 年的约 100 吉瓦扩大至 400 吉瓦。行政令批评 NRC 自 1978 年以来获准新建的反应堆中仅有两座投入商业运行，并直言其症结在于“一个根本性错误”：NRC 试图使美国人免于最遥远的风险，而未适当顾及这种避险做法在国内能源供应和地缘政治上的沉重代价。

行政令有关条款认为，LNT 模型关于辐射危害与剂量成正比、不存在安全阈值的假设“缺乏可靠的科学依据”，甚至可能要求核电厂把辐射防护做到低于天然本底的水平，并据此要求 NRC 重新审视以 LNT 为前提的 ALARA 标准，考虑采用明确的剂量限值，并与国防部(DOD)、能源部(DOE)及环境保护署(EPA)进行协商。根据行政令为整体改革设定

的时限：拟议法规须在 9 个月内发布，最终法规须在 18 个月内定稿。

按照行政令要求，NRC 于 2026 年发布辐射防护拟议法规，提出以分级管理方法取代 ALARA，并将辐射防护要求与明确的剂量阈值挂钩。“分级剂量管理方法”以确定性阈值为标尺，并明确“超过即须采取特定措施，低于则不适用”，不给主观判断留空间。职业照射方面，预期剂量超过 1 毫西弗/年即须开展辐射工作人员培训，超过 5 毫西弗/年（适用限值的 10%）须进行个人剂量监测。公众剂量方面，低于限值四分之一（0.25 毫西弗/年）的无需进行成本效益分析，达到或超过者，拟议法规认可的可接受做法之一是按 NUREG-1530 所载“每人·雷姆 5,200 美元”（2014 年币值，折合每人·西弗 52 万美元）的避免剂量成本基准权衡辐射防护投入。法规称，此举旨在“重新确立 ALARA 原则的原始意图”。

据美国保健物理学会（HPS）主席迈克·莱万多夫斯基（Mike Lewandowski）专题介绍，本轮辐射防护改革共涉及 27 项法规制定，触及 NRC 全部 55 项法规中的 47 项。整体格局可概括为“限值不动、机制重塑”：职业照射限值（全身有效剂量 50 毫西弗/年）与公众照射限值（1 毫西弗/年）维持不变，但拟删除“任一小时内 0.02 毫西弗”的公众瞬时

剂量率限制。流出物剂量约束改为双轨制，持照者可沿用现行 0.1 毫西弗/年的约束值，也可选用新的 0.25 毫西弗/年约束值。“计划特殊照射”改为“计划剂量限值延伸”，不再单独上报 NRC。接受放射性药物治疗患者的照护者剂量改按给药疗程设限，住院照护者每疗程 20 毫西弗，门诊照护者每疗程 50 毫西弗。ALARA 术语将被“完全停用”。NRC 承认尚无足够证据反驳 LNT，但认为 LNT 的非阈值特性“已导致与所获公众健康和安全收益不相称的监管负担”。

值得注意的是，拟议法规并未否定 LNT 本身。其一方面承认放射生物学进展“使简单线性外推趋于复杂化”，另一方面明确表示“目前尚不存在获得共识支持、可直接用于法规制定的 LNT 替代模型”。换言之，LNT 仍将是剂量限值的科学基础，此次改革要动的不是 LNT 本身，而是叠加在其上的 ALARA “政策层”。

以 BTI 为代表的改革派智库总体表示支持这一风险指引型改革方向，但仍指出其局限性：新法规只是规定了“到什么剂量档位，要做什么行政动作”，却没有回答“剂量低到什么程度，就可以不再继续降”。ALARA 之所以长期让业界头疼，就是因为它要求“合理可行的低水平”，但“合理可行”的边界在哪里，往往没有明确答案。实践中，相关单位即使已经把剂量压到远低于法定限值，仍可能被要求继续

优化、继续证明、继续解释，边际成本越来越高，而健康收益可能已经很小。

ALARA 从何而来：一项原则的七十年演变

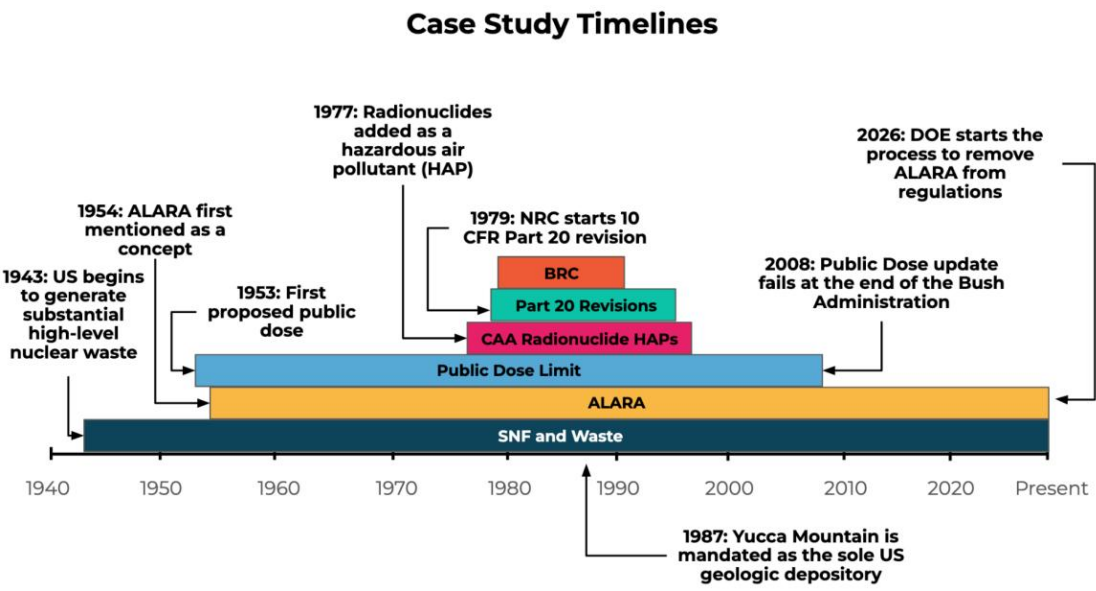


图 2.辐射防护领域重要案例时间线

BTI 的报告指出，ALARA 并非诞生之初就是法定义务，而是经历了从辐射防护原则到可执行法规的漫长演变，且这一演变与公众剂量限值的持续收紧相互交织、彼此推动。

1954 年，美国国家标准局第 59 号手册首次提出，辐射照射应“保持在可行的最低水平”，这是剂量最小化理念在美国官方文件中的最早表述。1966 年，国际放射防护委员会（ICRP）第 9 号出版物正式建议，一切不必要的照射均应避免，所有剂量应在考虑经济和社会因素的前提下，保持在“容易达到的尽可能低”的水平。1970 年，美国原子能委员会

(AEC) 提出核设施流出物应“尽可能低”，结果业界却要求其给出量化目标，理由是含糊其词只会加重许可的不确定性。于是在 1971 年，AEC 在 10 CFR 50 附录 I 中为反应堆流出物剂量设定了明确的数值设计目标。

1973 年，ICRP 第 22 号出版物将“容易达到”改为“合理达到”，并引入正式的成本效益分析框架，用以确定剂量降到什么程度才算“合理可行”。1977 年，ICRP 第 26 号出版物确立了正当性、最优化、剂量限值三大原则，奠定了现代辐射防护体系的基本骨架。1987 年，EPA 发布的联邦辐射防护导则纳入了 ALARA 理念，使其成为正式的联邦政策组成部分。1991 年，NRC 修订 10 CFR Part 20，将 ALARA 从倡导性目标升格为法定要求。

与 ALARA 同步收紧的还有公众剂量限值。1957 年，10 CFR 20 首次发布，公众剂量按职业限值 50 毫西弗的十分之一掌握，500 毫雷姆(5 毫西弗)/年遂成事实标准。1977 年，EPA 发布 40 CFR 190，将核燃料循环设施的公众剂量限值收紧至 25 毫雷姆(0.25 毫西弗)/年。1991 年，NRC 修订 Part 20 时采纳 100 毫雷姆(1 毫西弗)/年作为公众剂量限值。此次修订自 1979 年启动审查算起，历时逾 11 年，成为 NRC 历史上耗时最长的法规修订之一。

换言之，ALARA 在美国并非一开始就是一条“必须遵守”的法律，而是在公众剂量限值不断下调、核工业规模持续扩大的背景下，经过近四十年的层层推进，才从一项辐射防护理念变成了一条可执行的法规义务。1954 年的“可行的最低水平”只是一句建议，到 1991 年却成了许可证持有者必须证明其合规的法定标准。这一过程的本质，是辐射防护从“原则倡导”走向“法规约束”的制度化历程。

ALARA 的现实困境：一场没有终点的优化

BTI 认为，ALARA 的根本问题不在于理念，而在于它只指明了方向，却没有设定终点。剂量要求持续收紧，却始终没有一条“到此为止”的底线。由此形成一种棘轮效应：已经达到的更低剂量，反过来又被当作“合理可行”的新证据，进而被固化为新的基线。研究报告引用的数据显示，1973 年至 2022 年间，美国商用核电机组人均职业照射剂量下降约九成，但这一成绩反而不断抬高监管预期。结果是，收紧被视为审慎稳妥，放宽则容易招致批评，被指“以公众健康换取商业利益”，监管机构因此易进难退，只能不断加码。

更突出的问题在于，辐射这一单一物理危害在美国被切割为多个彼此独立、互不统属的监管板块。据统计，美国现有 79 项辐射防护法规分属 10 个联邦机构，同一危害在不同监管项目下的可接受风险水平差异达成千上万倍。这种差异

并非源于辐射实际危害的不同，而是源于监管框架本身的分裂。NRC 和 DOE 执行基于剂量的框架，EPA 则依据《清洁空气法》执行基于风险的框架，两套方法论并行运转却无法相互换算。如同一份低放废液，既是有机化学危险废物（由 EPA 依据《资源保护与回收法》管辖），又是低水平放射性废物（由 NRC 依据《原子能法》管辖），导致两个机构各管一半，企业必须同时走两套合规程序，两套标准不能互认，也不能互相替代。此外，职业安全与健康管理局（OSHA）的电离辐射标准自 1971 年起几乎未作更新，联邦航空管理局对空勤人员宇宙射线照射仅发布无约束力的指导文件，各协议州项目又增加了一层横向分割（同一类放射性材料，在协议州归州管，在非协议州归 NRC 管。且州与州之间的检查频次、执法尺度、许可细节都可能不一样）。

碎片化如何形成，又为何积重难返

BTI 的研究报告认为：美国辐射防护体系“并非设计而成，而是累积而成”。每一轮改革都是对上一轮失败的回应，却在解决问题之余埋下新的协调难题。

《清洁空气法》争端与 1992 年谅解备忘录

1977 年《清洁空气法》修正案赋予 EPA 独立于《原子能法》的放射性核素监管权，EPA 与 NRC 围绕核设施废气排放标准的拉锯战由此展开。1985 年，EPA 在法院裁定其未能

按时履职后发布标准，将 NRC 许可设施和 DOE 设施的公众全身照射剂量限制在 25 毫雷姆（0.25 毫西弗）/年、单一器官为 75 毫雷姆（0.75 毫西弗）/年；1989 年又提出对 NRC 许可设施适用 10 毫雷姆（0.1 毫西弗）/年乃至低至 0.3 毫雷姆（0.003 毫西弗）/年的新标准。1990 年，美国国会修订《清洁空气法》，规定只要 NRC 监管项目能够提供“充足的安全裕度”，EPA 即可不对 NRC 许可设施另行制定排放标准。1992 年，两机构签署两份谅解备忘录，EPA 承诺撤回针对 NRC 许可设施的《清洁空气法》标准，条件是 NRC 为非反应堆许可设施设定 10 毫雷姆（0.1 毫西弗）/年的公众照射管理目标；1996 年，EPA 正式撤回相关标准。

BTI 强调，两机构所签署的备忘录的稳定运行有赖一个前提：NRC 继续严格执行 ALARA。换言之，现行跨机构安排的制度基石，恰恰是此次改革要修改的对象。一旦 NRC 被认定为放宽标准，EPA “充足的安全裕度”认定的根基便会动摇，尘封数十年的法律争端可能重演。

“低于监管关注水平”政策的夭折

美国至今没有设置可忽略剂量（de minimis）标准，即低于某一水平的照射一概免于监管关注。BTI 研究指出，部分国家已参照 IAEA 导则建立了此类剂量阈值。其中英国对人工放射性核素设置的豁免基准为代表性公众成员年有效

剂量 10 微西弗，针对天然存在放射性物质（NORM）工业活动则采用 300 微西弗/年的豁免剂量基准。日本的解控水平（clearance level）以个人年有效剂量 10 微西弗为剂量基准，相关制度已写入《反应堆等规制法》。IAEA 在安全导则中规定：获得豁免的放射源或辐射实践，在所有合理可预见情景下，对代表性个体造成的年有效剂量不应超过 10 微西弗，配套集体有效剂量判据约为 1 人·西弗/年或更低。ICRP 也提出建议：若一项实践带来的年有效剂量处于 10 微西弗量级或更低水平，则该实践可免于进一步监管考量。

美国在该项监管规则上保持空白，主要源于 20 世纪 90 年代初一次代价高昂的政治教训。1985 年，《低放废物政策修正法》要求 NRC 制定标准，区分哪些放射性废物需要专门填埋、哪些可以常规处置，“低于监管关注水平”（Below Regulatory Concern, BRC）一词由此取代政治色彩较淡的“可忽略剂量”进入公众视野。1990 年，NRC 发布 BRC 政策声明，同时满足以下两项，即可适用 BRC 豁免：个人剂量上限为 10 毫雷姆（0.1 毫西弗）每年，集体有效剂量判据为 1000 人·雷姆每年。其中个人剂量限值仅为当时公众法定的 100 毫雷姆（1 毫西弗）每年剂量限值的十分之一。政策本身相当温和，却在舆论场掀起轩然大波，反对者将其定性为“以公众安全换取核工业利益”，12 个州和 100 多个地方政府相继立法禁止该做法或公开反对。1991 年，NRC 被迫宣布无

限期暂缓实施；1992年，国会通过《能源政策法》正式撤销该政策；1993年，NRC彻底收回该政策声明。BTI的研究报告指出，尽管其技术理由或成立，但三十年来各机构对可忽略剂量议题讳莫如深。

协调机构的四次尝试

为弥合机构分歧，美国联邦政府先后组建了四届协调机构，均收效有限。联邦辐射委员会（FRC，1959年至1970年）只在争议不大的议题上产出过4份导则，在铀矿标准问题上因3票对3票的僵局而寸步难行；辐射政策委员会（RPC，1980年至1981年）仅存活11个月便因未获拨款而夭折；跨部门辐射研究与政策协调委员会（CIRRPC，1984年至1995年）运行11年间，从未有一件机构间争端提交其裁决；跨部门辐射标准指导委员会（ISCORS，1994年至今）产出了调查测量和实验室分析方面的实用技术手册，但在政策争议面前同样无能为力。BTI的结论是：行政协调可以统一术语、共享技术分析、减少程序摩擦，却调和不了法规本身设定的相互冲突的目标。

BTI的核心建议：给优化装上“刹车”

将辐射防护三原则写入法规

BTI 建议 NRC 在法规中明确正当性、最优化和剂量限值三项原则及其相互关系，并说明分级管理方法如何逐项落实。其中，最优化应回归 ICRP 界定的本义：在综合权衡经济、社会和环境因素的基础上，确定适宜的防护水平，而不是一味追求剂量最小化。只有当进一步降低剂量所带来的增量健康效益足以证明其成本合理时，才应继续压减剂量。

设立可忽略剂量标准

BTI 建议的核心，是为分级管理补上一条底线：设定可忽略剂量水平。低于该水平时，残余风险已足够小，进一步降低剂量的义务即告终止。BTI 特别强调，这是监管层面的判断，而非科学意义上的“无效应”结论。低剂量下的生物效应，现有科学证据本就难以分辨，监管者不应把“证明生物阈值存在”作为划定边界的前提。

BTI 提出三档可选方案。长期首选方案是单个放射源每年 1 毫西弗（100 毫雷姆），但需同步调整公众剂量框架，并与 EPA 等机构协调。短期最优方案是 0.1 毫西弗（10 毫雷姆）/源，这是现行联邦框架内即可落地的最有力度选项。折中方案是 0.25 毫西弗（25 毫雷姆），即将拟议法规中已经包含的 0.25 毫西弗限值升格为正式的可忽略剂量阈值。BTI 说明，可忽略剂量标准仅免除进一步压减剂量的义务，监测、报告、记录、安保和核保障等独立要求一概保留。上述剂量

与每年天然本底照射相比微乎其微，在赋予监管灵活性的同时，不会带来不当风险。

NRC 与 EPA 须协同推进

BTI 指出，NRC 无法单独完成这场改革。EPA 当年正是基于 NRC 框架中的 ALARA 条款、流出物控制要求和已评估的数值范围，才认定 NRC 监管项目提供了充足的安全裕度。改革若要行稳致远，两机构应开展实质性联合工作，以修订后框架的具体要求为基础重建认定依据，而不是继续挂在 ALARA 名下。BTI 进一步指出，剂量框架与风险框架的分野源自《原子能法》与《清洁空气法》两部法律本身，行政手段能解一时之困，根本调和仍有待国会修法。

LNT 模型的科学争议

ALARA 与 LNT 一体两面。行政令要求二者同审，也把 LNT 的科学之争重新推到台前。

2025 年 9 月，ICRP 发表《放射防护体系的基本要素》一文，重申 LNT 模型具有科学性、实用性和审慎性，指出近年来多数流行病学研究支持低剂量辐射致癌风险的存在，剂量一响应关系与线性模型一致。所谓审慎，是在证据和机制尚不齐全的情况下，基于现有认知对癌症风险作出的慎重选

择。ICRP 同时强调，防护最优化不等于剂量最小化，而是综合权衡后的适宜防护水平。

LNT 模型长期受到部分学者挑战。有学者称 LNT 为“教条”，指出细胞具备清除活性氧、凋亡清除受损细胞、激活 DNA 修复等多重防御机制，低剂量下可能存在损伤阈值。还有学者则将 LNT 斥为“新顺势疗法”，长期倡导“激效效应”（hormesis）假说，认为低剂量辐射可能反而有益。但国内外不少学者认为：LNT 对高剂量效应的描述较为可靠，对低剂量则存在诸多不确定性，在新理论出现之前，沿用 LNT 仍属科学审慎之举。

值得注意的是，BTI 并不要求推翻 LNT，也不否认低剂量辐射的潜在风险，而是主张把科学问题与监管问题分开：科学上悬而未决，不等于监管上不能划线。值得一提的是，NRC 曾在 2021 年经审查后决定维持 LNT，理由之一正是 LNT 支撑着 ALARA 的持续适用。2026 年，DOE 也已启动程序，从其导则中删除 ALARA 表述，并拟通过新的法规制定删除相关内容。改革之势，可见一斑。

小结

BTI 研究报告反复申明一个判断：现行体系中的种种不一致，表面是技术分歧，实则是数十年机构决策层层累积的结果。没有人会从头设计这样一套体系，但每一块碎片在当

时都有其缘由。这也提示，辐射防护改革须分清两类问题：哪些可以通过行政手段就地调和，哪些必须诉诸立法解决。美国此轮改革能否走出“收紧容易放宽难”的循环，国际辐射防护界正拭目以待。

国际交流合作部 曾超 供稿

摘译自美国突破研究所、NRC、HPS 官网等

文章内容不代表本公众号观点