

# 美国核监管委员会科研情况

核安全监管的根基在于扎实的科学技术支撑。作为全球核安全监管领域的重要机构，美国核监管委员会（NRC）始终将科研工作置于核心位置，通过持续的技术研发与验证，为其风险指引、基于绩效的监管体系提供坚实基础。

本文基于 NRC 发布的相关文件，系统梳理其在系统分析、工程研究、风险分析、先进反应堆技术及未来前沿探索等领域的工作布局与重点方向。

## 一、科研工作总体概况

NRC 的核监管研究办公室是其科研工作的主要承担机构，负责为委员会在核设施监管、许可证审查、标准制定等各领域提供技术支撑。

在科研投入方面，NRC 每年投入约 8500 万美元的科研预算，配备 200 多名全职人员，形成了一支稳定的专业技术队伍。在科研产出方面，其运行着 40 多项主要科研项目，与 100 余个国际组织或国家签署了合作协议，累计发布 NUREG 系列技术报告约 30 份，制定或修订监管导则 20 余项，计算机代码用户超过 1 万人，并持续支持由高校牵头的核能相关科研项目。

从科研布局来看，NRC 的研究工作涵盖核燃料、热工水力、严重事故、辐射防护、人因工程、地震安全、网络安全、材料性能、概率安全评价等多个专业领域，形成了从基础研究到工具开发、从实验验证到应用支持的全链条科研体系。

## 二、面向未来的前沿研究

在确保现有核设施安全运行的同时，NRC 高度重视对未来技术的前瞻性研究，设立了“未来聚焦研究”项目，以应对核能领域不断涌现的新技术、新理念及其可能带来的监管挑战。

该项目的核心定位是为 NRC 在核能技术发展的前沿领域建立知识储备与技术能力。其研究内容具有较强的探索性和前瞻性，涉及动态概率安全分析、基于系统理论的事故模型与过程方法、数字孪生的监管可行性、自动化工具映射等方向。项目周期通常控制在三年或更短，以确保研究成果能够较快转化为实际监管能力。

自项目启动以来，NRC 人员的参与度和关注度逐年提升，反映出机构内部对前沿技术研究的高度重视。在项目运行的前三年中，已有近 80 份提案获得立项，资助金额达数百万美元，为后续研究奠定了良好基础。

与此同时，NRC 还通过“大学核能领导力项目”加强与高校的科研合作。该项目旨在激发高校研究人员围绕 NRC 监管使命开展创新性研究，培养核安全领域后备人才。在项目运行的初期阶段，每年收到提案数量接近 100 份，其中约 10 至 15 项获得资助，总资助金额可观。这一项目不仅促进了学术界与监管机构之间的知识流动，也为核能领域的长期发展注入了新的活力。

## 三、先进反应堆技术研究

随着核能技术的多元化发展，非轻水堆型的设计与应用

日益受到关注。为应对这一趋势，NRC 积极开展先进反应堆相关研究，为其许可证审查工作做好技术准备。

在软件工具方面，NRC 着力开发用于系统分析与源项分析的示范堆模型，完善相关计算工具，使其能够适应不同类型先进反应堆的特点。同时，通过参与国际实验项目、开展内部验证分析等方式，持续提升软件工具的预测能力与适用范围。

在技术导则方面，NRC 致力于制定风险指引、基于绩效的安全审查导则，涵盖抗震设计、材料性能、人因工程等多个领域。这些导则既考虑了不同堆型的技术差异，也注重保持监管要求的稳定性和可操作性。

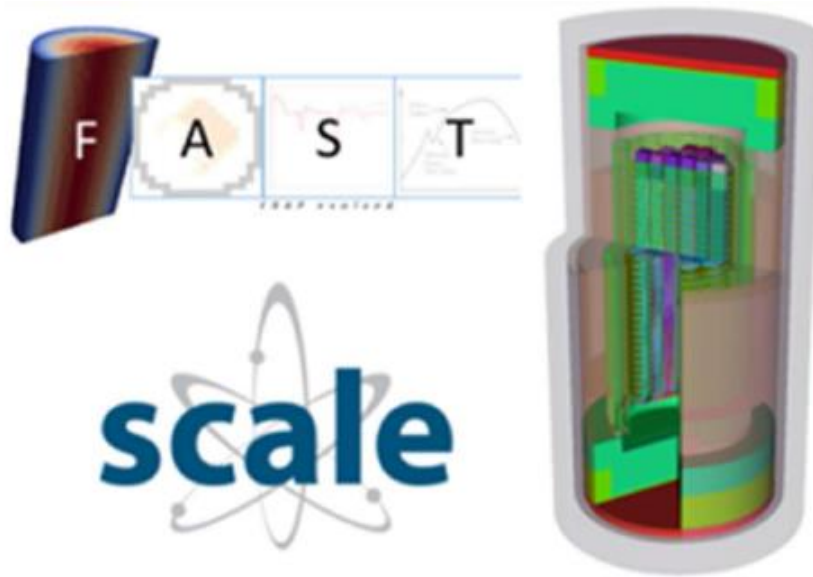
在标准制定方面，NRC 积极与标准开发组织、设计单位、能源部等相关方合作，推动形成适用于先进反应堆的工业标准。通过早期介入、密切沟通，力求在标准制定过程中体现监管要求，避免后续审查出现技术分歧。

具体研究成果包括：完成用于系统分析和源项分析的两类示范堆模型开发；完善大气扩散与剂量计算的源项分析工具；发布试用版监管导则；完成相关标准的技术认可等。这些成果共同构成了 NRC 面向先进反应堆监管的技术基础。

#### **四、系统分析研究**

系统分析是核安全研究的基础性领域，涵盖燃料与中子学、热工水力学、严重事故进程与源项、后果分析及辐射防护等多个方向。NRC 在这些领域的研究工作，既服务于现有核设施的安全评估，也为新型核能技术的监管提供支撑。

## （一）燃料与中子学分析



燃料性能与中子学特性是核反应堆安全分析的核心内容。NRC 在该领域的研究重点包括事故容错燃料、高损耗燃料、高丰度低浓铀燃料以及非轻水堆燃料等方向。

在软件工具方面，NRC 开发和维护燃料性能分析工具与中子学分析工具，用于开展燃料设计验证、核数据评估、临界与屏蔽计算等工作。这些工具既可独立运行，也为其他安全分析程序提供初始条件输入。

在实验验证方面，NRC 积极参与国际经合组织核能署（OECD/NEA）的相关合作项目，获取燃料与包壳行为实验数据，用于模型验证与不确定性分析。通过国际合作，NRC 能够以较低成本获得高质量实验数据，提升代码预测能力。

在人才培养方面，NRC 注重内部人员对反应堆物理现象的专业能力培养，包括临界与屏蔽分析、先进燃料设计评估等，确保在需要时能够独立开展确认性分析。

## （二）热工水力学分析

热工水力行为直接关系到反应堆的安全性能。NRC 在该

领域的研究重点集中在热工水力与中子学系统分析工具的维护与开发上。

TRACE 与 PARCS 是 NRC 在热工水力学领域的核心分析工具。它们用于开展最佳估算热工水力与中子学系统分析，支持现有及新型反应堆设计的确认性分析。与传统反应堆系统分析程序类似，这些工具依赖于多年国内外实验研究形成的经验关系式。

为验证和改进代码预测能力，NRC 积极参与多项国际实验项目，获取模型验证数据。这些数据经过评估后用于提升代码精度，增强其在实际应用中的可靠性。同时，NRC 持续利用这些工具支持研究堆与放射性同位素生产设施的安全审查工作。

在软件发布方面，NRC 保持定期更新的节奏，持续完善代码功能，并建立了一批电厂模型，以备许可证审查需求。

### （三）严重事故进程与源项分析



严重事故分析是核安全研究的重要领域，涉及事故从初

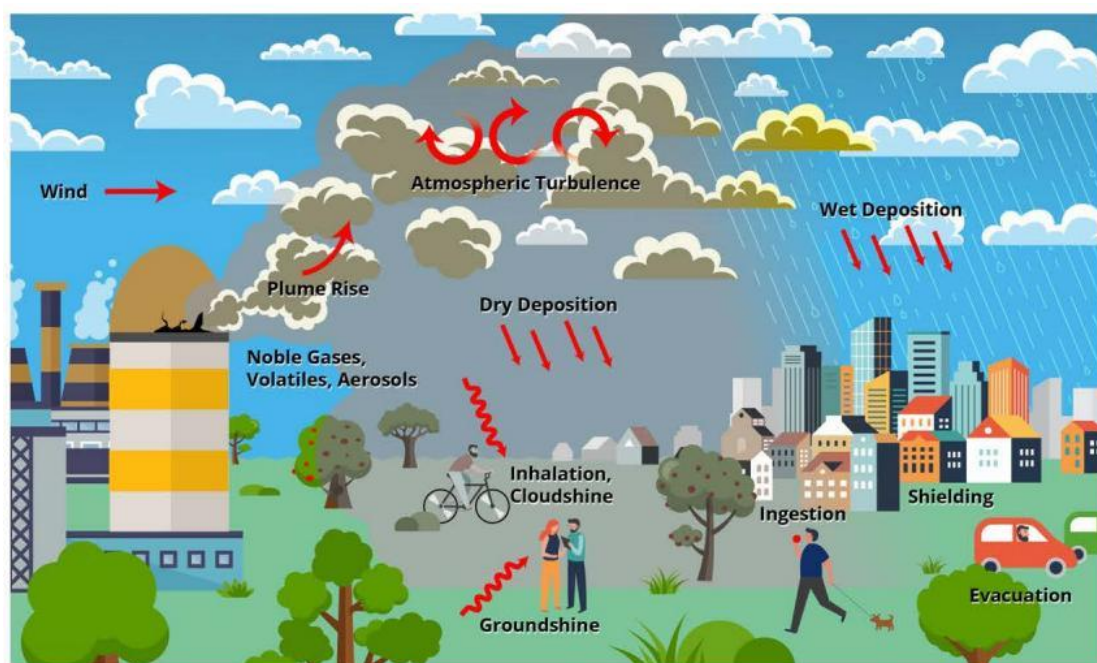
始发生到堆芯退化、裂变产物释放的全过程模拟。NRC 在该领域的研究工作以 MELCOR 程序为核心，致力于开发、验证和维护这一严重事故与源项分析工具。

MELCOR 作为系统级分析程序，能够模拟从事故触发到裂变产物释放、输运至安全壳及环境的全过程，支持安全问题的解决与风险指引型决策。

在技术发展方面，NRC 持续推动 MELCOR 的现代化升级，扩展其在事故容错燃料、高损耗燃料、高丰度低浓铀燃料、非轻水堆、小型模块堆等新技术领域的应用能力。通过参与 OECD/NEA 相关实验项目，获取代码验证数据，提升模拟精度。

在人员能力建设方面，NRC 利用 MELCOR 工具开展新技术的应用研究，保持内部人员对新堆型严重事故行为的专业判断能力。

#### （四）后果分析



事故后果分析用于评估严重事故对厂外公众健康与环境的潜在影响，是风险指引型决策的重要支撑。NRC 在该领域的研究以 MACCS 程序为核心，开展严重事故后果模拟。

MACCS 程序能够模拟放射性物质在大气中的输运过程，评估公众受照剂量、早期健康效应、经济成本及应急防护措施的效果。分析结果可输入成本效益研究，支持特定厂址严重事故缓解方案评估及环境影响评价。

在国际合作方面，NRC 充分利用国际组织及其他联邦机构的已有研究成果，持续改进 MACCS 程序。同时，通过开展非轻水堆源项后果评价、放射性物质环境释放分析等工作，不断提升该工具在新型核能技术监管中的应用能力。

#### （五）辐射防护研究



辐射防护研究涉及剂量评估、应急响应、职业照射监测等多个方面。NRC 在该领域的研究以 RAMP 系列计算程序为核心，支持核电厂许可与厂址选择、退役、大气扩散、应急响应等工作。

为提高程序使用效率，NRC 持续推进 RAMP 程序的整合与优化，将多个剂量评估程序进行合并，提升灵活性与用户友好性。通过参与国际合作，吸收全球范围内的研究成果，持续改进 RAMP 程序性能。

在成果产出方面，NRC 定期发布年度异常事件报告与职业辐射暴露报告，为国会决策与公众知情提供信息支持。同时，根据研究进展更新相关监管导则，确保辐射防护要求的科学性与时效性。

## 五、工程研究

工程研究聚焦核设施的结构安全、仪控系统与材料性能，为现代核安全监管提供工程技术解决方案。

### （一）抗震、岩土与结构



结构性能是核设施安全的重要保障。NRC 在该领域的研究重点关注抗震安全、岩土工程与结构长期运行性能。

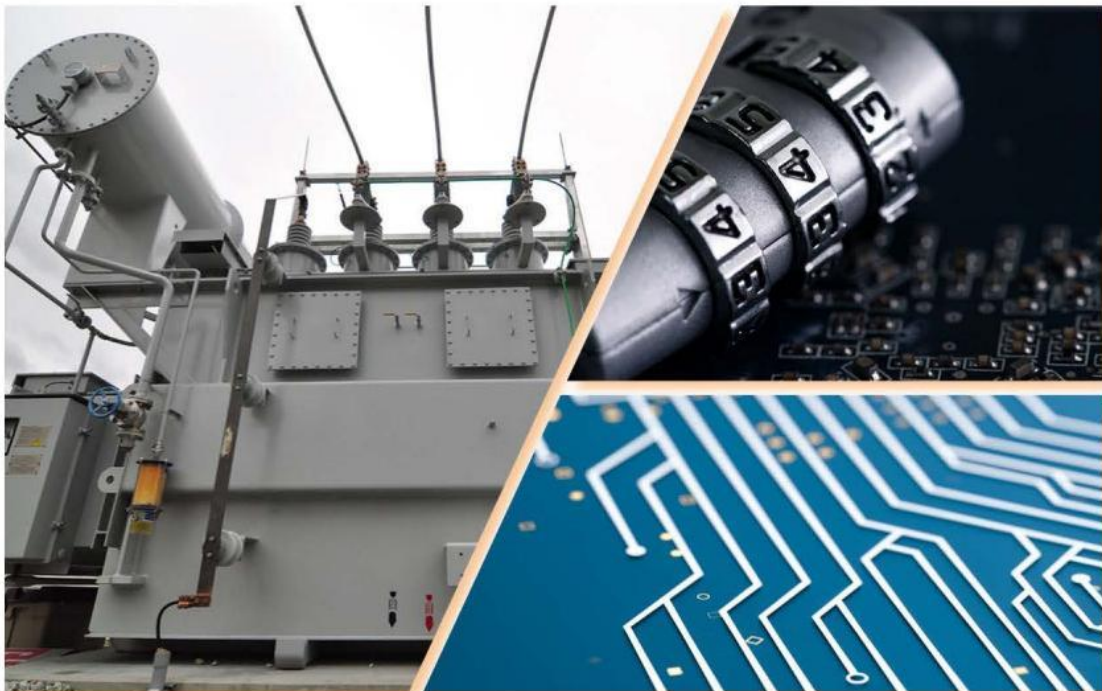
在抗震安全方面，NRC 研究先进反应堆的抗震分析与设

计方法，探索风险指引、基于绩效的抗震安全评估路径，包括隔震技术的应用等。通过更新震源特征与地震动模型，提升地震危险性分析的可靠性。

在岩土工程方面，NRC 关注地基稳定性、液化与古液化等问题的数据分析方法更新，为厂址评价提供技术支撑。

在结构长期运行方面，NRC 研究核电厂结构完整性、潜在退化机理以及设计与建造中的相关问题，尤其关注预应力混凝土安全壳的老化行为、辐照诱导混凝土劣化等方向。

## （二）仪控、电气与网络安全



随着数字化技术的广泛应用，仪控系统、网络安全与电气工程成为核安全监管的新兴重点领域。NRC 在这些领域的研究，旨在推动新技术在核设施中的安全应用，同时确保系统安全与数据完整性。

在数字化仪控方面，NRC 评估新技术的安全影响，提供许可证审查所需的技术信息，重点关注系统安全性与网络安

全性。

在电气工程方面，NRC 结合运行经验与许可证审查活动，开展电缆状态监测方法研究，评估设备老化对安全功能的影响。

在网络安全方面，NRC 研究确保数字化仪控系统在核设施中维持安全运行环境的方法，探索零信任架构、人工智能与机器学习在网络安全领域的应用前景。

### （三）材料性能



材料性能研究关注核设施制造与长期运行中的部件完整性。NRC 在该领域的工作覆盖先进制造技术、无损检测、完整性分析与材料退化等方向。

在先进制造方面，NRC 评估电子束焊接、粉末冶金热等

静压等高关注度技术在核工业应用的可行性，为后续许可证审查积累技术基础。

在无损检测方面，NRC 研究不同检测技术对缺陷识别与表征的有效性，探索建模与仿真在超声检测预测中的应用，评估自动化数据分析与机器学习技术的前景。

在完整性分析方面，NRC 维护与发展确定性及概率性断裂力学分析工具，用于评估老化部件潜在失效风险。

在材料退化方面，NRC 开展辐照脆化、应力腐蚀开裂等材料退化现象的实验研究，为部件完整性评估提供科学依据。

## 六、风险分析研究

风险分析是 NRC 风险指引型监管模式的核心支撑。研究工作覆盖人因可靠性、运行经验、风险工具与模型、火灾与外部灾害分析等多个领域。

### （一）人因可靠性与组织因素

人因可靠性分析是风险分析的重要组成部分。NRC 在该领域的研究致力于深入理解人、组织与系统之间的复杂交互关系，为新型核能技术与新型运行模式下的安全运行提供保障。

在方法开发方面，NRC 持续完善人因可靠性分析方法，包括用于事件与工况评估的综合人因事件分析系统、用于依赖性分析的方法、用于时间因素影响分析的方法、用于恢复行动评估的方法等。

在导则更新方面，NRC 根据新型与先进反应堆审查经验，持续更新人因工程审查模型与人机接口设计审查导则。

在数据建设方面，NRC 通过建立人因错误数据库，为方法开发提供数据支撑。同时，通过人因绩效实验设施开展实验研究，增强对人因行为规律的认识。

## （二）运行经验评价

运行经验是风险分析的重要信息来源。NRC 通过事故序列前兆（ASP）项目，系统评估运行事件中的风险信息，识别可能导致堆芯损伤的事故前兆，并按风险参数进行排序。

在数据收集方面，NRC 持续采集、编码、保障反应堆运行数据的质量，维护长期运行经验数据库，为风险模型提供设备失效数据与共因失效参数。

在数据分析方面，NRC 开展初因事件与厂外电源丧失事件评估，更新系统与部件可靠性研究。同时，通过与能源部合作，探索数据分析和人工智能技术在运行经验评价中的应用前景。

## （三）风险工具与模型



风险工具与模型是开展概率安全评价的技术基础。NRC 在该领域的研究以 SPAR 风险模型与 SAPHIRE 分析工具为核心，支持许可证审查、法规标准制定、监督及运行经验评价活动。

SPAR 模型覆盖所有在运核电厂，力求反映当前设计与运行状态。SAPHIRE 程序用于支持 SPAR 模型的开发与维护。在此基础上，NRC 持续推进三级概率安全评价项目，整合厂址内所有放射性源项，推动多机组风险、严重事故、人因可靠性等领域的实践发展。

在模型应用方面，NRC 每年完成大量 SPAR 模型更新，支持事件与工况评估。通过 SPAR 仪表盘等工具，为非风险专业人员提供风险洞察。

#### （四）火灾与外部灾害分析

火灾与其他外部灾害是核设施面临的重要风险源。NRC 在该领域的研究致力于开发用于分析火灾与外部灾害风险的工具、方法与数据。

在火灾安全方面，NRC 与电力研究院合作，改进火灾风险评估方法，包括高能电弧故障等场景。参与 OECD/NEA 相关试验项目，获取实验数据。持续完善火灾概率安全评价方法，提升评估的现实性。

在外部灾害方面，NRC 开展洪水、极端天气等自然灾害的风险评估方法研究，编制概率性洪水灾害评估导则，维护与扩展自然灾害信息数据库，为风险评估提供基础信息。

## 结语

从系统分析到工程研究，从风险评价到前沿探索，NRC的科研工作服务于其监管职责的各个领域，呈现出覆盖全面、重点突出、注重合作、面向未来的特点。其研究布局既立足于现有核设施的安全运行，又积极应对新技术的监管挑战，体现了以科学为基础、以风险为导向的监管理念。

对外交流合作部 余少青 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