美国新型核能燃料运输现状分析

2026 年 9 月，美国核能创新联盟发布报告，分析了美国新型核能商业化中燃料运输的现状，本文对该报告作编译介绍。

报告指出，美国核能行业依赖一套安全可靠的核燃料运输体系。半个多世纪以来，该体系在燃料循环各环节运输燃料未发生事故。这套体系是经审慎的联邦监管、行业实践和数十年的运行经验精心建成的，但其管理框架反映的是常规反应堆及其燃料的要求；随着新型反应堆技术走向商业化，将该框架从现行的规定性要求调整为包含更灵活、基于性能的替代方案，是支撑下一代核技术发展的必要条件。核监管委员会（NRC）正在积极修订其运输法规，这为制定有利于创新、基于性能的路径提供了机会。能否在商业化时间表内保持这一势头，最终将决定新型反应堆能否按时、按预算交付，以满足美国不断增长的能源需求。

铁路运输 B 型易裂变材料（BF）乏燃料货包

主要结论

报告提出三条主要结论。一是确保新燃料和乏燃料的运输安全与安保，这是保护工作人员、公众和环境的需要。二是现行运输法规以低浓铀（LEU）为基础制定，其铀-235 富集度为 3%~5%；新型反应堆需要的燃料富集度最高达 20%，而目前尚无针对富集度在 5%~20%之间的燃料开展商业化运输的优化货包。三是主动调整现行运输法规和货包认证要求，是新型核反应堆成功商业化的必要条件。

运输安全与监管

与固定设施相比，核材料运输存在特殊危害，原因是在长距离、有时是恶劣条件下运输放射性物质或反应堆本身存在固有风险。

美国运输框架可追溯至核能利用之初，并对国际运输要求产生了重要影响。该框架的一个基本假设是：运输事故无法完全避免，因此放射性物质包装必须能够承受所有预期事故条件，不论其发生概率高低。美国核燃料运输的安全记录，由一套涵盖联邦机构、州和地方政府以及私营行业的监管体系维持。

在联邦层面，运输部（DOT）、核监管委员会（NRC）和能源部（DOE）各自拥有不同但互补的管辖职责。DOT 依据《联邦法规汇编》第 49 编第 171、173—177 和 390—397 部分（49 CFR 171、173—177、390—397）对放射性物质运输实施监管，这些规则涵盖货包内容物的核实、托运人和承运人的责任，以及所有放射性物质陆运、空运和海运的文件记录；一般而言，DOT 规章要求任何核材料货包必须满足 NRC 或 DOE 制定的要求。NRC 依据《联邦法规汇编》第 10 编第 71 部分（10 CFR 71）负责确定易裂变材料运输的安全要求，重点针对用于运输易裂变材料（即燃料）的货包的设计、试验、鉴定、制造、使用和维护；10 CFR 73 E 分部还规定了运输途中的安保要求，包括运输路线要求和实物保护措施。DOE 负责通过其所属设施和国家实验室运输材料和燃料，并负责乏燃料的长期处置及其最终运往永久处置库。实践中 DOT、NRC 和 DOE 现行的运

输货包要求已统一为相同的安全要求，但各监管机构仍负责审查和批准其管辖范围内的货包。

州、地方和部落（印第安原住民）政府在这一联邦框架内运作，并拥有各自的具体权限。依据 DOT 路线规章（49 CFR 397.103），州级路线管理机构可以为放射性物质运输选择优先公路路线，以最大限度降低事故风险；依据 DOT 的 HM-164 规则，对于穿越保留地的运输，部落政府也拥有同样的路线决定权。对于任何乏燃料运输，持证单位必须与相关市、县和部落政府协调，各政府可能有自己的路线要求、通报程序和通行条件。上述各方的有效监管与相互协调，使行业得以维持良好的安全记录。

包装

用于运输乏燃料的货包是具有多层防护的包容系统，是燃料运输安全的基础。通常，内层容器装载燃料本身，外包装提供结构和热防护以及辐射屏蔽。这些防护层的设计目标是能够承受最严峻的事故条件。

NRC 依据 10 CFR 第 71 部分实施货包认证监管，即 NRC 批准某一货包设计可用于商业核燃料运输。货包按所运输材料的数量和类型分类：为放射性较低的材料设计的 A 型易裂变材料（AF）货包，必须证明能够承受运输的常规风险；放射性较高的材料，包括乏燃料，必须使用 B 型易

裂变材料（BF）货包，并按更严格的试验序列评价。除常规条件下的试验外，B 型货包还必须按顺序通过四项试验，证明能够承受严重的假想事故条件——自由下落：货包从 30 英尺（约 9.1 米）高处落到不可变形的表面上；穿刺：货包从 40 英寸（约 1 米）高处落到钢棒上；热试验：货包被 1475° F（约 802℃）的火焰完全包围 30 分钟；水浸没：货包必须能够承受 50 英尺（约 15.2 米）水深的压力。

认证是一个耗费资源和时间的过程。审查周期取决于货包设计的复杂程度和申请文件的质量，认证可能需要一年或更长时间，而设计新货包所需的试验数据可能需要再花费数年才能取得。除 NRC 认证外，核行业还采用了美国机械工程师学会核质量保证标准（NQA-1）认证项目。NQA-1 认证可使货包的安全性获得认可，但取得该认证所需的管理专业知识、部件和材料成本高昂，可能成为新公司开发货包的准入障碍。

AF 型和 BF 型货包还必须保持次临界状态才能获得认证，即货包内的材料在运输过程中不能维持自持链式裂变反应。富集度提高会增加易裂变材料的浓度，从而提高发生非预期链式反应的概率，这就要求货包设计采取比现有 LEU 认证货包更严格的临界控制措施。因此，NRC 认证的运输货包中，可用于富集度在 5%~20%之间的高丰度低浓铀（HALEU）核材料的数量有限。目前已认证的 HALEU 运

输货包包括欧安诺（Orano）的 Versa-Pac 和 NAC 国际公司（NAC International）的 OPTIMUS-L 货包。这些货包经改造后可以运输更大量的燃料，但目前无法支撑高效、经济的商业化规模运输；它们并非为商业化规模运输优化设计，只是在新的大容量货包完成认证之前暂时顶替。

DOE 和行业已注意到这一问题，并正在努力缩小差距。2025 年 12 月，DOE 宣布向五家公司提供 1100 万美元资助，用于开发和许可更多适用于富集度最高达 20%燃料的运输货包。行业也在独立推进该项工作。NANO Nuclear 公司及其合作伙伴德国核服务公司（GNS）正在开发一种优化的 HALEU 运输货包，初步评价表明该货包能够满足 10 CFR 第 71 部分的认证要求。NANO Nuclear 计划下一步正式与 NRC 接触以推进认证；但货包认证可能耗时数年，因此此类工作需要在相似的时间表上与反应堆商业化并行推进。

新型反应堆燃料的运输

历史上，所运输的燃料主要是低浓铀陶瓷燃料芯块，但许多新型反应堆设计将使用富集度更高、形态不同于常规 LEU 的燃料。对于其中一些先进燃料形态，商业化规模货包认证所需的临界安全数据仍在研究之中。现有法规因此必须重新审视，且每种燃料类型都需要单独评价。随着

更多新型反应堆投运，这些评价将影响新型反应堆燃料能否高效通过运输体系。

例如，熔盐燃料和金属燃料在操作和包装方面各有不同的考虑因素：两者有不同的化学要求和材料相互作用，而现有货包设计并非针对这些情况。NRC 正在对这两类燃料开展全面研究，以确保其监管框架能够为这些燃料的运输货包认证做好准备。通过评价某类燃料的衰变热、伽马射线和中子发射，以及贮存和运输过程中的材料性能，NRC 可以判断现行法规是否与其技术要求相容；NRC 的初步评估提示，现行法规可以调整适用，但具体技术挑战仍在评价之中。

并非所有先进燃料类型都会带来更多复杂性。三结构各向同性包覆燃料颗粒（TRISO）等燃料本身具有固有安全特性，即使在乏燃料状态下，其运输风险实际上也可能低于常规 LEU。确定哪些燃料类型可以适用较宽松的包装准则，将是制定高效、有效运输法规的重要环节，这将使开发商、持证单位和监管机构得以相应规划，避免可能拖延商业化时间表的不确定性。

各机构的监管框架都在积极演进，反应堆开发商在推进商业化过程中需要跟踪并参与并行的法规制定工作。NRC 正在依据第 14300 号行政命令全面修订其法规，其中

运输相关的最终法规预计于 2027 年 4 月出台；名为《货包认证要求现代化》（Modernizing Package Certification Requirements）的拟议法规已于 2026 年 7 月 27 日发布并公开征求意见，征求意见期于 2026 年 8 月 26 日结束。DOT 下属的管道和危险材料安全管理局（PHMSA）近期完成了 HM-265 法规修订，其目的是更广泛地提升公路、铁路和水路危险品运输的安全性和效率；由于 DOT 此次修订涵盖危险品的全部范围，而非专门针对新型核燃料，因此未考虑新型反应堆燃料类型的特殊性。

在 NRC 推进敲定核专项运输要求的同时，DOT 需要确保其承运人和路线规章与这些要求保持兼容。两个机构之间保持协调，可以减少法规不一致的风险，避免影响需要同时遵循两套要求的开发商和承运人。NRC 在完成先进燃料评价时，应与 DOT 协调，共享其评价结果，以确保 DOT 的承运人和路线要求能够充分考虑各类燃料的特殊性。

移动式微型反应堆的运输

移动式微型反应堆（Mobile micro-reactor）为货包认证和运输许可带来新的考虑因素。Radiant Nuclear 公司的 Kaleidos、西屋电气公司的 eVinci 等微型反应堆设计，拟以完整的预装料机组形态部署、迁移和再部署。按照 10 CFR 71，此类反应堆的运输没有专门框架：第 71 部分的标准是

为使用专用货包运输易裂变材料而制定的，而非用于运输装有完整燃料装载量的整个反应堆压力容器。

微型反应堆可以视为第 71 部分意义上的货包，这意味着它们可以按 A 型和 B 型材料货包的认证准则接受评价。开发商可以根据反应堆尺寸和燃料装载量，在两种路径之间选择：一是依据 10 CFR 71.12 申请豁免，采用风险指引的方法，证明某批货物虽未满足全部货包设计要求，但仍符合必要的安全准则；二是依据 10 CFR 71 将货包准则直接纳入反应堆设计，从而将反应堆认证为货包。豁免路径对首批部署可能有用，但并非为大批量应用而设计；第二种路径对大规模制造更具可扩展性和经济性，但会带来复杂且成本高昂的工程约束。

PELE 项目是首个军用可运输微型反应堆项目，为早期理解现行监管路径如何适用于移动式反应堆提供了重要参考。2024 年，美国国防部委托太平洋西北国家实验室开展研究，评估装载辐照燃料的可运输核电厂最可行的运输路径。研究结论是，可运输反应堆货包无法完全满足现有的第 71 部分要求，10 CFR 71.12 豁免路径是首批运输最切实可行的途径。该研究既阐明了现行路径的实用性及其局限性，同时也进一步论证了需要更具适应性的法规。

移动式反应堆运输相关的法规正在积极演进。2026 年 5 月，NRC 提出 10 CFR 第 57 部分，这是一套风险指引、基于性能的微型反应堆许可框架。该拟议法规将允许申请人在无法满足现行第 71 部分要求时，采用风险评价方法评估常规和事故运输条件，直接回应了当前框架下可能导致开发商不得不寻求豁免的分类缺口。第 57 部分提案是依据 2024 年《ADVANCE 法案》对 NRC 的授权制定的，该法案要求 NRC 为微型反应堆制定许可策略，其中明确包括预装料机组的运输。第 57 部分最终定稿并实施的速度，将影响监管框架能否在移动式反应堆准备就绪时同步到位。

运输物流

除监管要求外，运输新型燃料和移动式微型反应堆还需要运营资源，例如大型至超大载重商用运输车辆、经批准的运输路线、合格的驾驶员以及专业装卸设备。建设这类基础设施需要数年时间和巨额投资，而随着反应堆制造数量增加，对这些服务的需求也将增长。DOE 的公路运输承运人评估计划（MCEP）记录并监测承运人名单，供能源部/美国国家核安全管理局（DOE/NNSA）现场办公室和承包商运输放射性材料和危险废物，但目前具备运输这些材料资质和装备的实体数量有限。如果这一能力不能随反应堆商业化同步发展，那么无论监管和包装方面的问题是否已经解决，燃料都无法运输。

Atlas 铁路运输车系统说明了现有基础设施可以改造。Atlas 由 DOE 历时十余年开发，耗资约 3300 万美元，设计用于以最高安全标准运输重达 48 万磅（约 218 吨）的乏燃料。其承载能力和安全资质为适应移动式反应堆提供了良好前景，但鉴于其作为乏燃料专用运输工具的定位，在承担该功能之前可能需改造并重新认证。改造现有基础设施不可能一蹴而就，让更多人员取得资质、扩大承运人数量以满足商业化规模需求同样如此。物流基础设施是核燃料运输体系的组成部分，与法规和包装一样，需要与反应堆商业化同步发展。

DOT 和 DOE 应评估鼓励运输物流增长和创新的机会，包括与行业合作，使承运人资质、基础设施和劳动力队伍建设与反应堆商业化时间表相衔接。

结语

运输是核能成功商业化的一个条件。燃料运输作为核燃料循环中管理得当的环节，有赖于联邦机构、州和地方政府以及私营行业之间的严格监管与协调；随着新型反应堆设计从示范阶段迈向商业化，同样的协调必不可少。运输体系和管理运输体系的法规必须同步发展，任何单一实体都无法独自推动这一演进。

DOE 对 HALEU 包装开发的资助、NRC 的法规制定，以及行业将运输规划纳入反应堆设计，都是满足未来新型反应堆部署要求的重要步骤。调整运输和包装法规以满足新型反应堆燃料类型和设计的要求需要时间，NRC 依据第 14300 号行政命令开展的法规制定、联邦对开发 HALEU 货包的投入以及行业的参与，都反映出对这一现实的认识日益加深。能否保持这一势头，最终将决定运输体系是有效支持先进反应堆商业化，还是对其构成制约。

国际交流合作部 张灵宇 供稿

编译自美国核能创新联盟官网

文章内容不代表本公众号观点