

美国 NRC 聚变框架：奠定基础，而非终局

美国核监管委员会（NRC）正在推进一项关于聚变装置监管框架的拟议法规制定，主体是修订《联邦法规》第 10 篇第 30 部分（10 CFR Part 30）中关于副产品材料的监管框架，即《副产品材料国内许可通用规则》，使其能够涵盖多种聚变装置设计。拟议法规主要新增聚变装置定义和许可申请要求，并配套修改 Part 20（辐射防护）、Part 51（环境报告）等部分，同时调整多个法规中“副产品材料”定义。NRC 还发布了配套指南 NUREG-1556 第 22 卷《材料许可证综合指南：聚变装置许可证专项指南》草案，并广泛征求公众意见。



美国突破研究所（Breakthrough Institute, BTI）于 2026 年 5 月 27 日提交评论，总体支持 NRC 的监管路径选择，认为将聚变装置纳入 Part 30 框架正确且合理，符合《ADVANCE

法案》要求，包容技术多样性并与风险水平匹配。

在评论中，BTI 逐一回应了 NRC 征询的六大问题，并讨论了防扩散、场外剂量、退役资金等议题。同时指出拟议法规虽处理了多项事务，但部分内容受制于时间安排有待明确，呼吁 NRC 在最终法规中进一步澄清完善，以指导与协议州的协调实施。

一、氚报告与衡算

BTI 指出，现有报告框架主要适用于可清点、可追踪的离散材料，但聚变装置中的氚在增殖、消耗、渗透、吸收和循环等多个环节中分布，不具备这一特征。对于商业氘氚（D-T）聚变装置，氚库存更多受燃料循环平均处理时间影响，预期库存可能达百万居里量级，测量存在较大不确定性。

BTI 建议，这一框架可以包括以下内容：

1. 要求许可证持有人维持经过验证的计算模型，用于描述整个燃料循环中氚的产生、消耗、迁移和库存分布，并将平均处理时间作为报告的运行参数；

2. 根据实测值相对于预期运行参数的偏离触发报告，例如释放率、结构材料中的滞留量、回收效率等，而不是仅根据相对于固定阈值的库存差异触发报告；

3. 在适用的报告要求中区分稳态连续运行装置和批处理装置，例如短脉冲运行、且在脉冲之间完全回收燃料的脉冲装置。

NRC 近期应提高 §§ 30.55(c) 和 20.2201 中适用于聚变装置许可证持有人的氙报告阈值；但关于氙核算框架的具体问题，更适合在即将修订的 NUREG-1556 第 22 卷中处理。

二、§20.2008 废物处置与 Part 61 法规衔接

BTI 认为 §20.2008(a) 的修改是重要内容，拟议的“双路径”方案（证明废物与 §61.7 一致，或处置于场址特定侵入者评估 ≤ 0.5 rem/年的设施）是合理临时安排，但需进一步说明年剂量标准如何适用于一次性侵入事件。BTI 指出 §61.55 分类表源于轻水堆数据，未涵盖聚变活化产物，NRC 推迟废物处置相关修订将造成拟议法规间的顺序问题。

BTI 建议，在发布最终聚变法规之前，NRC 应将 §20.2008 条款与最终版 Part 61 框架进行协调，并明确回答两个问题：

1. 如果综合 Part 61 法规转向基于业绩的废物分类框架，§20.2008 条款是否会变得多余，还是会继续作为并行要求保留？

2. 如果 Part 61 法规修订废物分类表，并纳入与聚变相关的活化产物，§20.2008 中“与 §61.7 一致”的路径是否会更新为引用新的分类表，还是继续依赖 NUREG-1556 第 22 卷中的个案分析？

BTI 进一步建议将基于剂量的侵入者评估路径视为一种基于业绩的授权机制，在综合 Part 61 中考虑其更广泛适用性。

BTI 还建议，在 Part 61 法规最终完成之前，NRC 应完成以下支撑性分析：识别预计会落在 §61.55 分类表源项包络之外的聚变装置活化产物；与正在运行的商业低放废物处置场确认，其现有场址特定侵入者评估是否能够包络这些源项；明确许可证持有人或处置场在“与 §61.7 一致”路径或场址特定侵入者评估路径中应使用的方法和验收准则。

三、§20.2002 替代处置与低活度聚变废物(具体征求意见#3)

BTI 指出商业聚变装置将产生大量低活度活化结构材料，全部送至 Part 61 中的处置设施将增加成本并占用容量，安全收益不相称。BTI 认为，NRC 应制定与国际标准一致的极低活度聚变废物清洁解控或有条件释放指南。BTI 建议，至少应扩展 §20.2002 中专门针对聚变废物的指南。NRC 可以：识别具有代表性的聚变废物流；表征这些废物流的预期放射性特征；制定标准化的替代处置分析方法，供单个许可证持有人引用。BTI 同时提醒第一壁和面向等离子体部件接触剂量率可能达数千希沃特量级，需安排专门处理能力，并强调清洁解控不等于场址内无限期贮存。

四、出口管制

BTI 认为聚变装置本身属商务部（DOC）《出口管理条例》管辖，NRC 保留对氙和其他副产品材料出口权限，无需对聚变装置本身行使新权限。

五、兼容性类别与协议州能力

BTI 支持将相关定义指定为兼容性类别 B 以确保定义一致，但指出定义一致不等于实施一致。38 个协议州已承担监管权限，多数商业聚变装置将由州许可，其复杂性远超实验室规模经验。BTI 认为，NRC 应在最终法规前言中，或通过面向国家材料项目的协调沟通，明确将为协议州提供哪些支持，包括技术援助、培训、示范性许可程序，以及聚变专项工作组等。BTI 还建议，NRC 应与辐射控制项目会议（CRCPD）和协议州组织（OAS）协调，在聚变专项指南、培训和检查支持方面开展合作。对于协议州成本，BTI 认为联邦统一最低标准带来的收益超过实施成本。

六、保障监督与防扩散

BTI 认为这是法规文件中最重要分析缺口，法规仅提到事后触发 IAEA 保障，未回答高强度中子源本身是否具有防扩散相关性。BTI 建议 NRC 采取三项措施：

1. 在技术中立基础上说明，某些拟议商业聚变装置所具有的高通量中子产生能力具有防扩散意义，不论该场址当前是否持有受保障监督的核材料；防扩散分析也不应以运营方是否声明次临界组件或增殖靶件为条件；

2. 在 §30.32(k)(2) 中加入一项申请内容要求，要求聚变装置许可证申请人说明其副产品材料的预期采购和处置安排，并说明装置本身或这些副产品材料的任何计划出口将如何通过适当机构办理，即装置通过 DOC 在美国出口管制

条例（EAR）下办理，副产品材料通过 NRC 根据《原子能法》第 82 条办理；

3. 修订 NUREG-1556 第 22 卷，说明 §30.33(a)(5) 中关于共同防御和安全的判断应如何合理适用于聚变装置许可证申请。

七、场外剂量方法与 1 rem 触发阈值

根据 BTI 的意见，聚变装置应急计划的制定应基于场址边界 1 rem（10 mSv）阈值，并与拟议 Part 57 微堆框架保持一致。即使场外剂量低于该阈值，BTI 仍建议要求制定至少简单的应急计划，以确保法规一致性。若最终法规保留差异，NRC 应在前言中说明依据。此外，BTI 建议在 NUREG-1556 第 22 卷及相关指南中，明确可接受的弥散建模方法、默认假设及适用更保守假设的条件，并考虑聚变装置放射性核素的独特特征。

八、退役与资金保证

BTI 认为 NRC 需具体论证 §30.35 框架的充分性，不能仅以一般灵活性为依据。D-T 聚变设施退役特征（活化结构部件、氚渗透系统、大量废物、有限处置路径）与传统 Part 30 设施不同。BTI 建议，NRC 应制定或委托制定代表性聚变设施的退役成本估算，涵盖 D-T 托卡马克、仿星器以及其他相关设计类型，并评估现有资金保证分级和方法是否充分。

九、粒子加速器定义

BTI 同意将聚变装置定义纳入粒子加速器定义，但认为应更清楚说明专门要求与一般指南的关系。BTI 建议，应通过法规条款明确：聚变装置申请人通过 §30.32(k) 和 NUREG-1556 第 22 卷满足其 Part 30 义务，而不是通过一般加速器许可指南满足义务；或者至少应在最终法规前言中明确处理这一问题。

十、聚变装置定义

拟议定义包含两个要素：能通过聚变转化原子核，且能“直接捕获并使用由此产生的产物”。BTI 认为第二要素对加速器驱动或混合系统存在不确定性。BTI 建议，NRC 应收紧定义，明确该框架适用于设计上以捕获聚变反应产物作为主要生产性输出的设备，包括中子、带电粒子、电磁辐射或热；而不是适用于将这些产物作为驱动下游核过程或化学过程手段的设备。

十一、跨法规体系协调

BTI 指出聚变法规将在多个相关法规制定之后最终确定，协调是保证体系连贯的关键。BTI 建议 NRC：

1. 识别最终版副产品材料法规、Part 61 法规和 Part 20 法规中影响聚变装置许可的具体条款，并承诺在出现实质性不一致时重新审视聚变法规条款；

2. 明确处理新的 §30.32(k) 和 §20.2008 条款的协议州兼容性过渡问题，承认大多数商业聚变许可将在州层面进

行，且协议州修法周期将滞后于最终法规生效日期；

3. 鉴于州层面影响重大，与辐射控制项目会议（CRCPD）和协议州组织（OAS）就聚变专项技术援助和培训进行协调。

十二、BTI 建议汇总

1.提高适用于聚变装置许可证持有人的氚报告阈值，并在 NUREG-1556 第 22 卷中建立聚变专门氚核算框架；

2.在最终聚变法规发布前，将 §20.2008 废物处置条款与最终版 Part 61 框架协调；

3.制定极低活度聚变废物清洁解控或有条件释放指南，并扩展 §20.2002 替代处置指南；

4.确认 DOC 对聚变装置本身的出口管辖权，以及 NRC 对氚和其他副产品材料出口的权限；

5.明确 NRC 将向协议州提供的技术援助、培训、示范许可程序和工作组支持；

6.在最终法规或指南中补充保障监督和防扩散相关说明，特别是高通量中子源的防扩散意义；

7.要求聚变装置许可证持有人制定应急计划，并明确场外剂量和弥散建模方法；

8.制定代表性聚变设施退役成本估算，并评估 §30.35 资金保证框架是否充分；

9.明确聚变装置申请人通过 §30.32(k) 和 NUREG-1556

第 22 卷满足 Part 30 义务，而不是适用一般加速器指南；

10.收紧“聚变装置”定义，明确其与加速器驱动混合系统之间的边界。

十三、结论

BTI 总体支持 NRC 监管思路,提出的建议旨在进一步强化方案。建议在最终法规发布前通过法规制定记录、前言及 NUREG-1556 第 22 卷解决主要实施问题，并确保与副产品材料、Part 61、Part 20 及材料许可等相关法规协调。

对外交流合作部 逯馨华 供稿

编译自美国突破研究所官网

文章内容不代表本公众观点