

---

**第六十五届常会**

临时议程项目 15  
(GC(65)/1 和 Add.1)

**国际核安全组主席  
2021 年 7 月 8 日的信函**

2021 年 7 月 8 日，总干事收到国际核安全组主席理查德·梅泽夫的信函，其中提供了他对目前新出现的安全问题的看法。谨此分发上述信函，以通报大会。



## 卡内基科学研究所

理查德·A·梅泽夫

荣誉所长

[rmeserve@carnegiescience.edu](mailto:rmeserve@carnegiescience.edu)

2021 年 7 月 8 日

国际原子能机构

格罗西总干事

尊敬的格罗西总干事：

我谨以国际核安全组（核安全组）主席的身份致函。我们的工作范围规定，核安全组应向原子能机构和其他各方提供“关于目前新出现的安全问题的建议和意见”。在我作为主席的任期内，我一直照例不仅通过各种核安全组报告而且还以年度信函的形式努力履行这一义务。本信函构成今年的年度信函部分。我以往的信函可在核安全组网站上查阅，网址：<http://goto.iaea.org/insag>。

本信函将重点讨论对革新型先进堆设计的浓厚兴趣，以及考虑部署这些反应堆的成员国采取行动的必要性。核电是应对气候变化的一个重要工具，先进堆可以在应对气候变化带来的生存挑战所需的规模上提供无碳发电，较现有电厂更有优势。原子能机构正积极探讨转向采用先进堆可能涉及的问题。本信函旨在敦促成员国加倍努力，建立应对这些问题带来的挑战所需的能力。

许多国家正在应对气候变化的威胁，承诺到 2050 年或在那之前大幅减少碳排放。这将需要一场能源生产革命，而转变必须在目标日期之前的许多年开始。鉴于核电厂是长期投资，需要多年时间来进行规划、建造和并网，因此，为了迎接变化的世界，准备工作没有时间可以浪费。

世界上约有 440 座在运核反应堆，提供约 10% 的电力供应和约 30% 的无碳发电。其中大多为轻水堆，使用普通水作为慢化剂和冷却剂。毫无疑问，今后数年将继续依赖现有轻水堆和新的轻水堆。尽管如此，人们对革新型先进堆设计再次燃起了兴趣。其中一些反应堆采用不同的冷却剂（气体、液态金属或熔盐）、不同的慢化剂，并在许多情况下应用简化、非能动或其他创新手段来实现基本安全功能。有些反应堆利用快中子谱（轻水堆有热中子谱），其中一些使用富集度更高的燃料，或与轻水堆燃料呈不同化学和物理形态的燃料。有些反应堆有望在更高的温度下运行，从而提高热力学效率，实现更广泛的工艺热应用。对当前一些轻水堆而言，安保相关要素系电厂附加部分。革新型先进堆与之不同，可以通过在这些设想电厂的基本设计中纳入安保特性来加强安保。

此外，较之于现有电厂，拟议的设计在更大程度上利用工程、材料、计算机技术以及现代数字仪器仪表和控制方面的进步。

尽管近年的现有轻水堆电厂通常提供约 1 吉瓦（电）单位输出，但拟议的先进堆有不同规模。许多设计的功率输出从 50 兆瓦（电）到约 300 兆瓦（电）不等，即所谓的“小型模块堆”，而一个全功率电厂可能包含数个共用主控室的此种模块。一些供应商还在努力建造“微型反应堆”，即能够在偏远地区或紧急情况下提供可靠电力、功率输出为 1—20 兆瓦（电）的反应堆设计。

努力建造先进堆的供应商称先进堆有许多优势，希望新设计将能以更低的每千瓦小时成本提供电力输出，从而使核电比各种替代能源更具竞争力。事实上，如果核电要在应对气候变化方面发挥更大的主要作用，提高经济性很可能是至关重要的因素。通过批量工厂制造（从而最大限度地减少昂贵的现场施工）、模块化建造和标准化、先进施工技术和简化设计，相信可以实现更低的成本。此外，由于许多设计提供的电力输出小得多，因此对一些业主而言，资本投资总费用可能更加可控。较小的规模可能对区域电网较小的国家特别具有吸引力。（根据经验，任何电厂占电网容量的比例都不应超过约 10%，这样，在电厂为了换料或因安全原因而关闭时，便不会严重中断电力供应。）

许多转向无碳发电的国家正计划依赖可再生能源，由核电、贮存、可能还有具有碳捕获和贮存能力的化石发电来提供支撑。在这种变化的环境中，先进堆可能具有吸引力，特别是在其实现有竞争力的每千瓦小时成本的情况下。一些先进设计能够提高负荷跟踪能力，从而有助于应对可再生能源发电的间歇性。此外，在可再生能源电力充足时，核电厂的输出可以转用于氢生产（用作合成燃料或储能介质）、海水淡化、地区供热或工业过程应用。一些先进堆的较高温运行可以为开发利用这种多功能性提供更多机会。

原子能机构正开展许多活动来应对先进堆将带来的各种问题，但核能界（监管者、营运者、供应商、承包商、设备供应商、技术支持组织、标准组织和建筑师）也需要应对其面临的挑战。事实上，由于小型模块堆可能对启动核电国家特别具有吸引力，这些国家将因其可能是首批应用这些先进堆技术的国家而面临特殊挑战。

其中一些挑战包括：

安全。所有先进设计都声称比现有设计具有显著的安全优势。许多设计的堆芯放射性核素含量较低（因此事故源项较小），一些设计考虑使用与目前用于轻水堆的燃料相比，能够在失效前承受更高温度的先进燃料。其他一些设计在近大气压下运行，避免了轻水堆运行时的高压（这在事故中能够驱动碎片和放射性核素移动），从而减少了对坚固管道、压力容器和安全壳结构的需要。许多先进设计依靠非能动系统（即利用重力、自然对流或压力梯度的系统）来实现安全目的，而不是依靠泵、自动阀和交流电。较之于现有反应堆，预计先进堆依靠运行措施和人为干预来确保安全的情况较少，从而能够放宽为补偿人为失误而使安全规定重叠的监管战略。如果行之有效，如

此种变化有可能带来显著的安全优势，并提供一种以降低成本的方法简化反应堆的途径。但需要进行由测试数据、验证代码和模拟工具支撑的细致分析，以确定这类系统在其受到依赖的各种环境中行之有效。

先进堆可能也会带来新的安全挑战。例如，那些依靠多模块实现所需总功率的设计将需要仔细考虑各模块在瞬态和事故中可能发生的相互作用。钠冷快堆将需要考虑和防范钠-水和钠-空气化学反应的影响。熔盐堆将需要仔细考虑腐蚀问题和管道中熔盐可能冻结的问题。事实上，革新型设计可能会有因其新颖而难以确定的故障模式和事故序列。在分析先进堆的安全论证文件以及根据这些不同技术调整其目前以轻水堆为重点的监管要求时，监管者必须做好应对重大挑战的准备。同时，维持充分的纵深防御和确保事故预防与事故缓解之间的平衡也非常重要。

**安保。**如上所述，大多数现有反应堆的设计都没有将安保问题作为主要关切，但随着恐怖主义威胁增加，运行期间的安保已显著升级。在新电厂的设计中，有机会、也有必要纳入安保考虑因素。许多现代设计的堆芯都设置在地下，从而增强了抵御飞机攻击等蓄意破坏的能力。非能动安全系统、更小的堆芯、耐受事故燃料和自动化使用的增加（从而限制内部威胁挑战），所有这些都望改善安保。电厂布局中的安保考虑同样可以降低重要区域的脆弱性。关键是，在评价新设计时，应同时考虑安全和安保，以确保适当满足这两个目的。即将提出的正由核安全组和核安保咨询组（安全咨询委员会）联合编写的一份报告将强调加强安全和安保间协调的重要性。另见核安全组，《核电厂安全和安保之间的接口》（2010年）（INSAG-24号）。

**保障。**许多先进堆设计为使用铀-235丰度高达20%的燃料，这显著高于目前典型的约5%的丰度。伴随这种丰度变化而来的是更高的安保和保障要求。更为重要的是，一些先进堆的设计要求对乏燃料进行后处理，使其处于稳定的化学状态，以便贮存和处置或通过反应堆进行再循环。任何此类处理都需要保障监测，以确保可用于武器的材料不被转用。同样，保障应与安全和安保一起被视作设计的一个方面予以考虑。

**燃料。**许多先进堆考虑使用新的燃料形式，就一些熔盐堆而言，甚至使用溶解在熔盐冷却剂中的燃料。所有燃料均须表现出一定程度的事故耐受性，同时符合各种性能标准，例如，裂变产物的保留以及包壳与冷却剂的兼容性。此外，一些先进堆考虑使用后处理燃料，甚至钚基燃料循环。有关新燃料类型性能的数据可能有限，但需要有这类数据来支持安全论证文件。

**应急规划/选址。**现有轻水堆核电厂通常选址偏远地区，以保护公众在发生事故时免受放射性核素影响。一些先进堆的供应商认为其设计能够证明放宽这种选址要求的合理性，声称其设计足够安全，或者事故后果足够小，完全有理由对当前选址方案进行修改。事实上，如要实现反应堆的某些拟议用途，这种放宽绝对至关重要。例如，一些供应商预计其设计将用于为工业应用提供高温工艺热，这要求反应堆位于使用工艺热的设施（例如，可能是化工厂）附近。必须证明邻近设施中的事件或事故不会危及反应堆的安全。一些小型模块堆供应商还认为，或许可以部署其设计，用于替代类

似规模的化石电厂，从而受益于现有的输电设施和附近的冷却水。许多这样的化石电厂靠近城区或位于城区之中。考虑到先进堆所承诺的安全特性，有必要对选址和应急响应问题进行仔细的早期审查，以确定这类反应堆未来的经济机会范围。

国际贸易。许多供应商显然对国际销售抱有希望。事实上，考虑到批量生产可能带来的预期效率，大量海外销售可能是其业务计划的重要组成部分。例如，预计小型模块堆对发展中国家可能特别具有吸引力，因为除了所承诺的安全优势以及建造更快和运行成本更低外，较之于吉瓦（电）规模的轻水堆，其总成本应该更可控，并且电力输出可能更适合较小的电网。然而，存在着一种危险，即为了满足电厂销往的每个国家的许可证审批要求，可能需要进行调整或修改。这显然会增加成本，对国际部署前景产生消极影响。

尽管原子能机构和核能机构为统一许可证审批要求作出了重要努力，但继续关注这一问题对于能够实现先进堆的承诺可能至关重要。供应国和接收国之间也应有密切的技术和监管关系。见核安全组，“首座核电厂的许可证审批”（2012年）（INSAG-26号）。

废物。许多先进堆承诺会延长燃料循环，而且产生的乏燃料会比现有轻水堆少。然而，正如最近一封年度信函中指出的那样，乏燃料处置方面的进展一直异常缓慢，现有大多数有核国家都没有处置途径。见核安全组 2019 年年度评定函。随着越来越多的地方有越来越多的反应堆，处置挑战只会越来越大。这个问题不解决，会在最需要核电之时破坏核电利用的前景，因为那些担心核电的人就能合理地将废物状况作为拒绝核电的理由。乏燃料和高放废物的积累问题终究必须面对，没有理由拖延。

材料。一些先进堆可能因恶劣的化学环境、高温或快中子对结构的轰击而带来材料挑战。这为应用新材料（新包壳、新合金等）克服这些挑战提供了机会。但新材料必须经过测试，以确保其性能。需要迅速采取行动，提供允许使用这些材料所需的测试数据。

数字仪器仪表和控制。许多先进堆的设计包含了对自动化的广泛使用，通过利用技术减少对操作人员的要求和潜在的人为错误以及减少主控室的人员配备来改进安全性。必须应对与确保此类系统可靠性相关的监管问题，以及与新冷却剂、燃料和安全系统相关的技术问题。此外，随着更多地依靠数字系统和人工智能，最近的事件突显了加强网络安全的重要性。

公众接受度。在许多国家，由于对核电技术的恐惧，公众不愿接受对核电的依靠。如果要想实现核电的作用，就必须承认和应对这一现实。核工业界有义务以开放、易懂的方式讨论核安全问题，并回应合理的疑问和质疑。公众信任的建立需要坦诚和透明地承认与核电相关的问题，以及对其成本和收益作出均衡评价。

总之，如果先进堆要在应对气候变化方面发挥重要作用，就必须克服许多艰难挑战。原子能机构正在尽自己的努力。由于革新型先进堆的设计在技术上多种多样，原

子能机构正努力建立一个技术中立的安全、安保和保障框架，以促进制定统一的安全标准。但正如本信函所指出的那样，核能界所有人都有许多工作要做，在应对挑战方面的任何拖延都将限制核技术及时为应对气候变化威胁做出贡献的机会。

核安全组将继续监测围绕先进堆前景的许多活动，并打算根据情况需要不时提出建议。同时，如果核安全组可以提供这方面或其他方面的帮助，请随时与我联系。

顺致问候。

谨启，

[签名]

理查德·A·梅泽夫

抄送： 副总干事莉迪·埃夫拉尔  
核安全组成员