

可持续的核能

Y.Sokolov和R.Beatty

国际原子能机构开发的评定工具协助成员国开展有关 可持续核能开发和部署的战略规划和决策

制定有关能源系统发展和核能在其中的潜在作用的长期战略规划，需要充分理解技术变革和创新的动力。对与能源有关的基础结构、社会偏好、经济发展方向和环境制约的认真思考必须作为国家核能部署的一部分。核能系统评定连同应用这一方法进行首批核电机组的能源规划和核基础结构开发是国家核电发展的一个不可缺少的部分。特别是，实施核电计划涉及代际影响和责任，远远超过100年。

能源规划旨在确保有关能源需求和供应基础设施的决定涉及所有利益相关者，考虑所有可能的能源供应和需求面选择，并与国家可持续发展总体目标相一致。核能将成为多元化能源结构的一部分这一决定，应包括反应堆技术选择、首批机组所需基础结构的开发以及对部署可持续核能系统的全部影响和考虑的理解，包括核技术和制度安排的创新，这种创新是由全球发展引起的，并且有助于全球发展。

核能系统包括核燃料循环的所有环节，即从采矿到所有废物的最终结束状态以及有关制度安排。核能系统的特点在于基础设施复杂、寿期长和容易延续几代。此外，核能的发展或扩大，特别是新型和创新型部件的设计和商业化，需要很长的交付周期和大量的资源。核能系统必须经过整体评定，即从可持续发展的所有可能角度，包括社会发展、经济发展和环境保护这3个相互依存和相互加强的支柱，这些全部由有效的政府机构联系起来。

应用革新型核反应堆和燃料循环国际项目方法的核能系统评定

为协助成员国评估现有或未来核能系统的长期战略规划，国际原子能机构的“革新型核反应堆和核燃料循环国际项目”在包括来自“第四代国际论坛”的一些专家在内的300位国际专家的参与下，开发出“革新型核反应堆和核燃料循环国际项目”方法。核能系统评定是利用“革新型核反应堆和核燃料循环国际项目”方法这个国际认可的工具，为各成员国有关核能开发和部署的长远规划和战略决策提供支持的一种整体方法。

核能系统评定的一个前提，对“新来者”来说是能源规划研究，对具有成熟核电计划的国家来说是国家能源战略。能源规划研究在国家层面上确定了核能在能源供应结构中的潜在作用，同时适当考虑到地区和全球的趋势。国际原子能机构能源规划模型帮助能源规划者开展这类研究。国家负责能源政策或核能系统规划的机构可发起一项全面的评定或广泛的核能系统评定。

应用“革新型核反应堆和核燃料循环国际项目”方法的核能系统评定是对某一特定核能系统中的所有核设施的评价，从采矿到所有废物的最终结束状态，包括高放废物的永久处置及所有相关的制度措施。核能系统评定考虑到核设施的完整寿期（“从摇篮到坟墓”），即设计、施工、运行和退役，并从该方法开发者确定

革新型核反应堆和燃料循环国际项目： 促进对话与革新的伙伴关系

国际原子能机构的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”在从国家、地区和全球的角度理解未来核能系统发展以及理解支持这一发展的技术革新和制度安排方面起着重要作用。

作为国际原子能机构成员国帮助确保核能有助于以可持续的方式满足21世纪能源需求的承诺而建立的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”，把技术持有者和使用者集合起来共同考虑为实现核反应堆和燃料循环的必要革新而需要采取的国际和国家行动。

“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”为来自工业化国家和发展中国家的专家和决策者在可持续核能规划、开发和部署的所有方面进行讨论和合作提供了平台。该项目促进了拥有核技术国家和考虑应用这些技术来发展新核能力的国家之间开展互利对话，还为成员国制定关于核能开发和部署的国家战略规划和决策提供了支持，并增强了未来技术革新方案的意识。

如果国际原子能机构成员国和公认的国际组织为“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”做出贡献，就可以成为该项目的成员。贡献形式包括捐赠预算外资金，提供免

费专家，应用“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法进行评定研究，或参与“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”下的合作项目。

自2001年建立以来，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”成员已发展到31个。他们代表全球国内生产总值的75%和全球人口的65%。

另外10个国家因为正在考虑加入或正在工作层面上参与该项目，因而具有观察员身分。此外，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”正在与“第四代国际论坛”和“欧洲可持续核能技术平台”等其他国际倡议合作，以确保良好的协同作用和避免重复劳动。

该项目的资金主要来自于预算外捐款，目前受益于俄罗斯联邦最近做出的连续5年提供资源的承诺。这增加了该项目的稳定性，并使其能够做出更长远的规划。最近，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”活动合并为5个主要领域，这5个领域也构成了该项目2010年和2011年行动计划的基础。在“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”成员国的参与下，12个合作项目为这些

的7个领域评定核能系统，包括经济、基础结构（制度安排）、废物管理、防扩散、实物保护、环境（应激物的影响和资源枯竭）及反应堆和核燃料循环设施的安全，这7个领域共同构成了可持续发展的各个方面。

拥有既定核计划的国家，以及正在考虑开展新核计划的核“新来者”可以开展核能系统评定，以查明其核计划可能存在的缺口，并确定填补这些缺口的相关行动。这样做的目的是：

① 对于核技术开发者，通过评估其长期开发和部署战略，确定该战略是可持续的并拥有正确平衡的核设施；

② 对于经验丰富的核技术使用者，增加对主要利益相关者的认识，并协助其制定有关核能系统扩大的战略规划和决策；

③ 对于预期的核技术首次使用者，确

定当决定逐步开发核能系统即开发必要的核基础结构和建设首座核电厂时需要考虑的问题。

国家评定

最近，阿根廷、亚美尼亚、巴西、印度、韩国和乌克兰等一些国家开展了一系列国家级核能系统评定。此外，加拿大、中国、法国、印度、日本、韩国、俄罗斯和乌克兰这8个国家联合开展了有关由闭式燃料循环钠冷快堆组成的核能系统的研究（见第42页方框“快堆闭式核燃料循环”）。

国家级核能系统评定研究是由技术使用者和开发者进行的，包括不同规模的评定。阿根廷和乌克兰通过评定所有核燃料循环设施，评价了其规划的国家核能系统的可持续性。巴西、印度和韩国从“革

活动提供支持。

“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”计划领域

应用“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法的核能系统评定

随着“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法的开发和应用，该项目最近实现了一个里程碑。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法能够帮助各国对现有和未来的核能系统进行整体评定，并支持长期战略规划和决策。经过第一阶段的一系列成功研究，另有8个国家表示愿意评估现有或未来的核能系统，以确定其是否符合国家可持续发展的标准。

可持续核能的全球构想

通过制定可能的方案和协调全球核能开发和部署的长期构想，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”有助于“新来者”和“成熟”的核电国家共同理解技术革新及新的制度安排和法律方案对于在21世纪开发和建设一个可持续的核能“结构”的潜力，包括可能的转型方案。

促进核能技术的革新

这一领域的主要活动是促进“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”成员国在选定的核

能技术革新和相关研发方面的合作，这些合作有助于可持续的核能。

促进制度安排的革新

除了核燃料循环的全部环节之外，制度安排也是核能系统的一部分。这些安排包括协定、条约、国家和国际法律框架或体制以及公约。部署新的反应堆设计可能需要革新的制度措施办法，特别是对于非固定式中小型反应堆。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”促进在该领域的合作，并支持各国制定和实施革新型制度安排。

“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”对话平台

这一交叉领域旨在促进核技术持有者和使用者之间的信息交流，以确保未来的技术和制度革新满足双方的期望。

“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的成员包括：阿尔及利亚、阿根廷、亚美尼亚、白俄罗斯、比利时、巴西、保加利亚、加拿大、智利、中国、捷克、法国、德国、印度、印度尼西亚、意大利、日本、韩国、哈萨克斯坦、摩洛哥、荷兰、巴基斯坦、俄罗斯联邦、斯洛伐克、南非、西班牙、瑞士、土耳其、乌克兰、美国和欧洲委员会。

www.iaea.org/INPRO

新型核反应堆和核燃料循环国际项目”方法选定的方面评定了具体反应堆设计和相关的燃料循环。巴西研究小组选择了“国际革新安全型反应堆”设计，对其安全性和经济性进行了评定，此外，还从安全和防扩散方面对固定床核反应堆设计进行了可持续性评定。印度研究小组对在运输部门以氢气替代化石燃料进行了研究。韩国研究的主要目标是通过开发一种定性分析方法来确定压水堆乏燃料在坎杜型反应堆中的直接利用燃料循环的防扩散水平。在该循环中，压水堆乏燃料被转化为供坎杜堆使用的新燃料。亚美尼亚开展核能系统评定最初是为了使国家决策者熟悉有关在2025年左右将现有的反应堆替换成装机容量较大的反应堆的核电计划的所有问题。

通过模拟不同的核技术如何有助于实现核能的扩大以及模拟可以考虑哪些问

题和方法才能快速实现快堆闭式核燃料循环，这项联合研究探索了几种可能的情景。

革新型核反应堆和燃料循环国际项目方法

“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法分为基本原则、用户需求和标准三个层次结构，由指标和验收范围组成。这些因素被用于“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的7个评定领域。如果一个核能系统经评定满足所有原则、要求和标准，那么该系统代表着符合国家可持续发展标准的一种能量来源。如果评定存在缺陷，那么应该进行进一步的研发。

如果并不是所有因素都得到满足，一个特定的核能系统仍可为满足一个国家或地区的能源需求做出重大的过渡性贡献，

快堆闭式核燃料循环

在过去两年间，8个国家联合起来应用“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法评定基于快堆闭式核燃料循环的核能系统。这项“联合研究”的目标是确定快堆闭式核燃料循环是否满足可持续发展的标准，确定部署核能的里程碑，以及确定需要未来合作研发的领域。这些国家包括加拿大、中国、法国、印度、日本、韩国、俄罗斯和乌克兰。基于成熟技术的近期快堆闭式核燃料循环系统，如钠冷却剂、混合氧化物芯块燃料和水法后处理技术，被用作参考系统。

综合观察表明，核能部署的最佳未来可能与当前的国家计划不完全一致。本着使快堆闭式核燃料循环成为替代常规能源的一种可行方案的目标，这项联合研究确定了目前国家方案中存在的必须解决的一些弱点，特别是经济和安全问题，需要深入研究才能将严重事故的风险降至较低水平。

目前正在运行的快堆闭式核燃料循环核能系统设计可能不符合经济竞争力的要求。通过有针对性的研发来简化设计、增加燃料燃耗和降低成本，以及小批量建设，使快堆核电厂的造价可以与热中子堆核电厂和化石燃料电厂的造价相当。

在一些国家，引进快堆可以增加钷燃料和改性铀燃料的使用，从而有助于核燃料资源的有效利用。如果需要，这些燃料可在快堆增殖区生产。

快堆闭式核燃料循环系统通过开发和引进新技术来实现核裂变产物和次锕系元素的最佳管理，它将拥有满足当今废物管理所有要求的潜力。

鉴于快堆闭式核燃料循环系统的技术特点，其防扩散性能可以相当于或高于一次通过式燃料循环。快堆闭式核燃料循环系统是实现易裂变材料均衡使用的关键技术。

快堆闭式核燃料循环系统需要采取地区方案或多边方案来处理燃料循环前端和后端服务，以及向全球核结构的过渡。

由于这项联合研究的结论也要求尽可能采取跨学科的方法和国际合作，作为后续行动，在“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”下启动了一些合作项目，以解决下列确定的问题：

› 基于包括闭式燃料循环在内的热中子堆和快堆的核能系统总体结构（革新型核能系统的总体结构）；

› 为液态金属冷却堆设计安全级别的衰变热排除系统的综合方法；

› 评估大型核能系统内基于满足21世纪可持续发展原则的闭式燃料循环概念的先进革新型核燃料循环（通过技术整合实现革新型核系统燃料循环）；

› 调查研究关于高温运行的反应堆堆芯通过液态金属和熔盐冷却剂排热的技术挑战。

但是将需要改变和发展，才能长期具有可持续性。核能系统评定结果可用于指导这种发展。



国际原子能机构出版物“革新型核能系统评定方法应用指南：革新型核反应堆和燃料循环国际项目手册——方法综述（TECDOC 1575号文件第一次修订版）”

介绍了如何应用“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法进行核能系统评定。

Y.Sokolov是国际原子能机构副总干事、核能司司长和“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”负责人。电子信箱：Y.Sokolov@iaea.org。

R.Beatty是国际原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”组长。电子信箱：R.Beatty@iaea.org。