

推 动 创 新

各 国 关 注 下 一 代 核 电

Judith Perera

在过去的几年中，出现了几个探讨核能中长期开发前景的多国倡议。其中包括：美国领导的第四代国际论坛（GIF），IAEA 的国际创新核反应堆和燃料循环项目（INPRO）和欧洲关于核能在欧盟的竞争力和可持续性的米开朗基罗网络（Micanet）。还有两项大型研究——由 IAEA 与经济合作与发展组织（OECD）国际能源机构（IEA）和核能机构（NEA）一起进行的联合调查：创新核反应堆发展；国际合作的机会；以及由麻省理工学院（MIT）对核能未来进行的跨学科研究。

所有这些研究涵盖了基本相同的基础，都着眼于包括反应堆和燃料循环在内的创新核能系统。然而尽管是由同样一套根本需要推动之外，它们在某种程度上也各不相同，特别是它们对核燃料循环的重视程度。GIF 和 INPRO 是两项可能促成更高级别国际合作的倡议。

GIF 倡议

GIF 基本上是一项美国倡议。1997 年，总统的科学

技术顾问委员会分析了国家的能源研究与开发，拟定了一个解决下个世纪能源和环境需要的计划。这项计划提到了确保有一个可行的核能方案来帮助满足未来能源需要的重要性，其中包括为了实现这个方案而适当集中研发工作来解决乏核燃料、扩散、经济和安全这些主要障碍。为此，美国能源部（DOE）发起了核能研究倡议（NERI），以解决影响未来美国核能利用的技术和科学问题。1998 年，能源部设立了独立的核能研究顾问委员会（NERAC），就能源部民用核技术计划向部长和核能、科学和技术办公室（NE）主任提供咨询意见。

GIF 的工作集中在一个或多个第四代核能系统的合作开发和示范方面，这些系统可能具有经济性、安全性和可靠性、可持续性的优点，并且可能在 2030 年前投入商业使用。GIF 的目标是共享专门知识、资源和试验设备以提高效率和避免重复。（GIF 成员见表。）

副总统的国家能源政策发展小组 2001 年 5 月发表的《国家能源政策》（NEP），支持扩大核能作为满足不断增长的美国能源需求的一个主要部分。2002 年 9 月，NERAC 第四代技术规划小组委员会发表了《第四代核能系统技术路线图》。配合 GIF，选出了 6 种创新反应堆概念及其支持性的燃料循环供进一步的合作研究与开发，它们也是 NERI 支持的创新研究与发展项目的核心领域。它们是：

- ▶ 气冷快堆（GFR）——快中子谱、氦冷反应堆和闭式燃料循环；
- ▶ 甚高温反应堆（VHTR）——使用一次通过铀燃料循环的石墨慢化氦冷反应堆；
- ▶ 超临界水冷反应堆（SCWR）——在水的热力学临界点以上运行的高温高压水冷反应堆；
- ▶ 钠冷快堆（SFR）——快中子谱、钠冷堆和有效

INPRO 成员	同时参加 INPRO 与 GIF 的成员	GIF 成员
阿根廷	阿根廷	阿根廷
巴西	巴西	巴西
保加利亚	加拿大	加拿大
加拿大	法国	法国
中国	韩国	日本
捷克	南非	韩国
法国	瑞士	南非
德国	组织成员： 欧洲委员会	瑞士
印度		英国
印度尼西亚		美国
韩国		
荷兰		
巴基斯坦		
俄罗斯联邦		
南非		
西班牙		
瑞士		
土耳其		
组织成员： 欧洲委员会		

INPRO 截至 2004 年 6 月的状况。Euratom、IAEA 和核能机构的观察员参加 GIF 会议。

管理锕系元素和转化铀-238的闭式燃料循环；

► 铅冷快堆（LFR）——快中子谱、铅或铅/铋低共熔液态金属冷却反应堆和有效转化铀-238和管理锕系元素的闭式燃料循环；

► 熔盐反应堆（MSR）——在超热中子谱反应堆中用循环的熔盐燃料混合物生产裂变电力和使用全部锕系元素再循环的燃料循环。

以上反应堆预计在今后30年内可投入使用。相对的优点包括基建费用减少，核安全性提高，核废物产生量最小，并且进一步减小了武器材料扩散的风险。对选定系统中的四种已经着手开展工作。为第四代核能系统确定的目标是：

► 可持续性：满足清洁空气目标和提高系统长期可用率和全世界能源生产的有效燃料利用；最大限度地减少核废物和管理核废物以及减少长期管理工作；

► 经济性：提供优于其他能源的寿期成本；提供可与其他能源项目相比较的财政风险水平；

► 安全性和可靠性：有很高的安全性和可靠性；堆芯损坏的可能性和损坏程度非常低；消除对场外应急响应的需要；

► 防扩散能力和实物保护：成为一条非常难于实现的和最令犯罪分子失望的转移或盗窃武器可用材料的路线，以及提供对付恐怖主义行动的加强实物保护。

GIF研究已经规定了四类核燃料循环，包括一次通过、部分钚再循环、全部钚再循环和超铀元素全部再循环。根据世界能源理事会和国际应用系统分析研究所提出的核能需求预测对这些核燃料循环做了100年的模拟。

一次通过循环被证明是产生最多乏燃料形式废物的铀资源最密集的循环方式，但是产生的废物与其他能源技术比较仍然很少。铀资源至少到本世纪中期足以满足一次通过循环。然而，限制因素是处置库空间是否够用。这成为一个主要问题，需要在今后几十年内开发新的处置库。从超过50年的更长时期看，铀资源的可用性也是一个限制因素。

采用完全闭式燃料循环的系统可以减少处置库空间并降低性能要求，不过成本必须保持在可以接受的水平

上。采用闭式燃料循环，可以分离核废物，并且以最好的策略分别予以管理。先进的废物管理策略包括嬗变选定的核素、高效的衰变热管理、灵活的临时贮存和不同的废物处置在不同的地质环境。它们也有望通过大量回收大多数长寿命放射性重元素，把要作地质处置的废物的长寿命放射性毒性至少减少一个数量级。

还可以在共生燃料循环中将不同反应堆结合起来，包括热中子反应堆与快中子反应堆的结合。从热中子系统产生的锕系元素可以再循环进入快中子系统，从而减少全世界锕系元素总量。改进气冷热堆或水冷热堆的燃耗能力也可以有助于一个共生系统中的锕系元素管理。热中子系统也可以发展一些特色，例如在高温气冷反应堆或经济性很好的轻水反应堆中生产氢，作为一个提供更加可持续未来的综合系统的一部分。

GIF的研究同时发现，核能在市场上是独特的，因为它的燃料循环费用仅仅占它生产成本的20%左右。这些研究进一步表明，采用一种比一次通过循环先进的燃料循环是有可能以合理的成本实现的。

国际项目：INPRO

INPRO是2000年IAEA成员国为了确保核能作为一种可持续资源可用来帮助满足21世纪的能源需要而通过的一项决议中提出的。为了使核能在全球能源供应中发挥举足轻重的作用，将需要创新的方法来解决与经济竞争力、安全性和废物和潜在的扩散风险有关的问题。因此，INPRO的立足点比其他倡议更加长远，是惟一从发展中国家潜在用户的角度并根据它们的具体需要来解决问题的倡议。INPRO确定的“用户”除能源最终用户之外还有各种群体，包括投资者、设计者、电厂营运者、监管机构、当地组织和主管机构、国家政府、非政府组织和媒体。

INPRO设法把所有感兴趣的IAEA成员国聚集一起，既有技术持有者又有技术使用者，共同考虑为实现渴望的核反应堆和燃料循环创新所需要采取的国际和国家行动。这些创新应该利用可靠的和有经济竞争力的技术，并且尽可能以具有固有安全特性、能最大限度地减少扩散风险和环境影响的系统为基础。其目标是通过一

种过程，把所有有关各方集合起来，对现有研究机构的活动以及正在进行的国家和国际倡议施加影响、从中吸取教训并且予以补充。

INPRO的范围涵盖核反应堆和预期未来将与有关的燃料循环一起投入运行的燃料循环设施。虽然 INPRO 在进行必要的分析时考虑的时间范围为50年，但是这并不意味着这些技术将会在这一期间实行。然而，预期当前的、改良的和创新的设计在这一期间内将会混合使用和同时存在。INPRO 还没有解决任何特定的技术。

在 2001 – 2003 年，INPRO 在其 1A 阶段提出了若干套基本原则 (BP)、用户要求 (UR) 和准则，以便在辩论核能未来作用时对各种关键问题——经济竞争力、安全性、废物、扩散、保安和实物保护以及可持续性——的不同概念和方法进行比较。它不仅集中于技术要求，而且提出制度、法律和各种基础结构问题——主要是在不断全球化的进程背景下——方面的建议。这个阶段于 2003 年 6 月结束，其间建立了评定不同概念和方法的方法学和指导原则。

从 2003 年 7 月开始的 1B 阶段包括通过个案研究和检验成员国可提供的创新核能技术来确认 INPRO 的方法学。检验工作将由各个成员根据在 1A 阶段建立的基本原则、用户要求、准则和方法学进行。它还将包括对创新反应堆和燃料循环信息资料的初步收集。6 个 INPRO 会员国表示要通过应用 INPRO 方法学对选定的国家创新核能系统进行国家个案研究：

- ▶ 阿根廷：包括 CAREM 反应堆和 SIGMA 燃料富集过程的 CAREM-X 系统。
- ▶ 印度：APHWR 反应堆（先进重水堆）和包括用于嬗变废物的一座快增殖堆和一座加速器驱动系统的燃料循环。
- ▶ 韩国：DUPIC（在 CANDU 堆中直接使用轻水堆乏燃料）燃料循环技术。
- ▶ 俄罗斯联邦：使用氯化物燃料的 BN-800 反应堆系列和与之相联系的平衡态燃料循环。
- ▶ 中国：球床高温气冷反应堆。
- ▶ 捷克：熔盐反应堆（由第四代国际论坛所选定的概念）。

此外，由专家组成的若干工作组正在进行个案研究，这些研究涵盖了国家个案研究没有解决的那些技术，以便确认尽可能完整的方法学。

这些研究和一些个案研究的最后结果将报告给 2004 年晚些时候召开的第 7 次 INPRO 指导委员会会议。届时将依照选定的要求和准则评定创新核反应堆和燃料循环概念。利用第一阶段的成果，第二阶段将着眼于可用的技术和启动一个国际项目的可行性。

INPRO 迄今一直依靠 IAEA 成员国所给予的政治、财政和技术支持（尤其是俄罗斯，它提供了大部分的项目财政支持），但是从 2004 年起部分资金将列入 IAEA 正常预算。（INPRO 成员见表。）

INPRO 方法学的主要特点是它提供了关于核能潜力及其利用后果的信息。除考虑了工作量、资源和时间方面的有关消耗之外，还考虑了社会及其能源需求的发展方案。这将有助于 INPRO 成员确定和评价未来核能系统的必要组成部分，其中包括反应堆、废物处理设施、燃料制造和再循环设施等。它还将有助于各国确定改进现有各部分供未来应用和根据需要开发新的部分所要求的研究、开发和示范（RD&D）工作。

在经济性方面，INPRO 考虑涵盖了未来可能发展的四种市场情景。这些情景均具有不同程度的全球化和区域化以及对经济增长与环境限制关系的不同看法。如果所提供的创新核能系统具有经济竞争力，INPRO 相信它们会在满足未来能源需要中发挥举足轻重的作用。但是为了保持总单位能源成本的竞争力，必须考虑和管理整个的组合成本（投资费用、运行和维护、燃料，等等）。对燃料费的限制意味着对燃料循环设施投资和运行费用的限制，燃料循环设施包括矿山、燃料生产和富集、燃料后处理以及退役和由这些设施产生的废物的长期管理。

关于可持续性，INPRO 已经确定了两项基本原则：一项与核能所引起的环境影响的可接受性有关，另一项与创新核能系统在 21 世纪以可持续方式产生能量的能力有关。环境保护被认为是基本的，而系统要有可持续性，不能在其预期寿命中半路就耗尽重要的资源（例如易裂变/可转换材料或水）。系统还应该至少能像可以接

受的备选方案一样有效地利用它们，不管是核的还是非核的。

关于安全性，INPRO 的原则和要求是根据目前趋势外推确定的，并且设法包含发展中国家和转型国家的可能利益。对于核反应堆来说，基本安全功能是控制反应性、堆芯排热、放射性物质约束和屏蔽辐射。对于燃料循环设施，基本安全功能是控制次临界度和化学过程、排出放射性核素的衰变热、约束放射性和屏蔽辐射。创新核能系统的发展应该以考虑一体化燃料循环的风险和影响的整体寿期分析为基础。

废物管理的安全性与核装置的相比较涉及不同的时段，在很多情况下有不同的源项和路径。IAEA 为放射性废物管理确定的现有 9 项原则已经被 INPRO 不加修改地全盘采用。

因为电力需求的预期增长主要在发展中国家，所以 INPRO 认为应该特别注意这些国家。对于那些只需要少数核电厂的国家，开发一个有完全能力的国内供应结构将是不合理的。国际公司可以提供建造和运行核电系统所必要的大多数基础结构，并且可以供应有价值的服务。

需要全球合作

为了开发新的核技术，大家一致同意需要国际努力。已经讨论了在现有项目之间建立某种合作的问题，并且正在取得进展。

GIF 的技术目标和 INPRO 的用户要求在经济、安全、环境、燃料循环和废物、防扩散以及可持续性方面有许多类似或相同的内容。筛选候选创新概念的方法似乎十分类似。然而也有某些明显的差别：

► GIF 已经处于开始研究与开发阶段，而 INPRO 才刚刚完成用户要求的编制；

► GIF 主要解决几个工业发达国家的要求，而 INPRO 对一般核电给予更深入的考虑，同时考虑国家和地区的特点；

► 预期 INPRO 将为创新反应堆和核燃料循环提出更广泛的技术建议，将会满足几乎所有国家的需要，而且不仅仅是核能有关各方。

► INPRO 还设法解决工艺要求之外的问题，特别是在建立各国必要的基础结构方面进行国际合作的可能优势，以及在法律和制度结构上的创新。在这点上 INPRO 准备考虑发展中国家的需要。

► GIF 把它的考虑限制在具有不同类型反应堆和相应燃料循环的独立的核能系统。

► INPRO 认为这种系统的结合应该适应国家、地区和全球的不同核电发展方案。

GIF 和 INPRO 有着更密切合作的基础，因为它们的工作重点是不同的。GIF 成员主要是技术持有者，并且 GIF 正在考虑很复杂的技术。然而 INPRO 视亚洲为未来的核能市场，其中也包括发展中国家，在这些地方需要更简单但是更可靠的系统。INPRO 包括了来自发展中国家的成员，因此可以更深入地了解它们的需要和要求。

2003 年 6 月的 IAEA 维也纳国际核燃料循环和核电技术创新会议强调了创新作为核能未来的一个决定性因素的作用。印度原子能委员会主席 Anil Kakodkar 博士强调了核能作为多样化能源结构一部分的重要性。然而，他说，在发展中世界和发达世界之间存在一个根本的矛盾。许多发展中国家认为，不扩散措施大部分被用于阻止有意义的技术传播。

在 2003 年 9 月的 IAEA 大会上，各国通过了一项决议，强调了在开发创新核技术方面开展国际合作的必要性以及通过合作努力可以实现的巨大潜力和高附加值。决议还强调了确定与其他的国际创新核技术发展倡议联合行动的重要性。

合作更密切的多国方法显然正在取得进展，尽管某些障碍尚待解决。随着开发工作的展开，INPRO 和 GIF 之间的协调不久就会开始。

Judith Perera 作为核能和有关方面的作者、编辑和顾问有 15 年的经验。本文由她在《国际核工程》2004 年 1 月刊中的报告改编而成。电子信箱：JudithPerera@aol.com。有关 IAEA 通过 INPRO 进行的工作的进一步情况见 www.iaea.org/INPRO/。