IAEA-TECDOC-1434

创新型核反应堆和燃料循环的评估方法

创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）1B 阶段（第一部分）报告

IAEA
国际原子能机构

2005 年 7 月

IAEA-TECDOC-1434

创新型核反应堆和 燃料循环的评估方法

创新型核反应堆和

燃料循环国际项目（INPRO）

1B 阶段（第一部分）报告

IAEA
国 际 原 子 能 机 构

2005 年 7 月

本出版物的发起单位是国际原子能机构核能司
参与单位包括核安全和核保安司和保障司
International Atomic Energy Agency
Wagramer Strasse 5
P.O. Box 100
A-1400 Vienna, Austria

创新型核反应堆和燃料循环的评估方法
创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）1B 阶段
（第一部分）报告

国际原子能机构，维也纳，2005 年
IAEA-TECDOC-1434
ISBN 92-0-508505-7
ISSN 1011-4289

国际原子能机构于奥地利印刷
2005 年 7 月

前　言

创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）根据 IAEA 大会决议（GC(44)/RES/21）于 2000 年启动。INPRO 旨在帮助确保核能在 21 世纪的可持续应用，并将所有感兴趣的成员国（技术所有者和技术使用者）组织到一起，共同考虑为实现所期望的创新而采取的行动。

INPRO 正在分阶段进行。在第一步，即 1A 阶段，INPRO 为评估创新型核能系统（INS）制定了一套基本原则、用户要求和准则以及配套的评估方法，这些共同组成了 INPRO 的成套方法。1A 阶段的结果被收录在 2003 年发布的 IAEA-TECDOC-1362 中。

本报告记录了 INPRO 第二步（即 1B 阶段（第一部分），2003 年 6 月—2004 年 12 月）中对基本原则、用户要求、准则和评估方法的变更。在这期间，成员国和专家进行了以测试和确认 INPRO 成套方法为目标的 14 项个案研究。如本报告中所记录的，根据对这些个案研究的反馈和大部分由 IAEA 主持的若干次咨询，INPRO 成套方法已经得到了重大的完善和修订。

根据成员国在应用该成套方法中的经验反馈，以及 INPRO 正在进行的和将要开展的工作，INPRO 成套方法将进一步得到修改。因此，在适当的时候将以发布附加报告的形式来更新 INPRO 成套方法。

IAEA 高度赞扬 INPRO 的免费专家和本报告篇尾所列的各位参与人员所做出的贡献，以及指导委员会在维也纳召开的会议所提供的宝贵指导和建议。IAEA 还想对负责编辑本报告的 C. Allan（加拿大）、F. Depisch（德国）和 N. Rabotnov（俄罗斯联邦）表示感谢。

INPRO 的 1B 阶段（第一部分）由 IAEA 的项目主管——IAEA 副总干事兼核能司司长 Y. A. Sokolov 和项目协调员——核能司的 J. Kupitz 负责实施。截至 2004 年 12 月底，已有 22 个成员国参加 INPRO。

编 者 按

本报告中使用的国家或领土的具体名称，并不意味着出版者国际原子能机构对这些国家或领土、其当局和机构、或它们的边界划定的法律地位的任何判断。

本报告提及的具体公司或产品名称（不论是否按照其注册名称提及），并不意味着有任何侵犯产权的意图，也不应解释为国际原子能机构表示认可或推荐。

本报告由中国原子能工业公司翻译部翻译。

目 录

摘 要

创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）根据 IAEA 大会决议（GC(44)/RES/21）于 2000 年启动。该项目依据的是由俄罗斯联邦提出、并获得诸多 IAEA 成员国支持的一项倡议，即为开发创新型核反应堆与燃料循环技术开展广泛的国际合作，因为倡议者认识到：

- 在 21 世纪为人类提供可持续的能源供应将需要大规模推广应用核能以及其他能源资源；
- 核电是一项能够提供几乎无限能源的能源技术，而且其推广应用能降低环境污染以及待管理的废物量，包括温室气体的排放量。

截至 2004 年 12 月，INPRO 共有 22 个成员：阿根廷、亚美尼亚、巴西、保加利亚、加拿大、智利、中国、捷克共和国、法国、德国、印度、印度尼西亚、摩洛哥、荷兰、大韩民国、巴基斯坦、俄罗斯联邦、南非、西班牙、瑞士、土耳其和欧洲委员会。

INPRO 的主要目标是：

- 帮助确保核能可在 21 世纪以可持续的方式对满足能源需求做出贡献；
- 将技术所有者和技术使用者组织到一起、共同考虑在核反应堆和燃料循环中实现所期望的创新所需要的国际和国家行动；以及
- 建立一个所有利益相关者都能参与的论坛，这些利益相关者将对现有机构的活动以及在国家和国际层面上正在实施的倡议施加影响，从中汲取经验，并且对其有所补充。

为了实现上述目标，INPRO 已采用了一种分阶段的方法。在被称为 1A 阶段的第一步中，任务组已——在经济、安全、环境、废物管理、防扩散和基础结构领域——建立了由创新型核能系统（INS）来实现可持续能源供应总目标所必须满足的基本原则、用户需求和准则组成的层次结构。此外，还初步开发了用于评估核能系统的 INPRO 方法。基本原则、用户要求和准则以及 INPRO 评估方法共同组成了 INPRO 成套方法。INPRO 成套方法为考虑 IAEA 成员国（包括发展中国家和发达国家）的本地、地区和全球边界条件提供了可能。

1A 阶段工作已于 2003 年 6 月完成，这一阶段的工作成果已登载在《创新型核反应堆和燃料循环评价指导》（IAEA-TECDOC-1362）上。在 1A 阶段工作完成后，下一步工作紧接着就开始了。在这一名为 1B 阶段（第一部分）的工作中，

INPRO 安排——由国家工作组或分别来自 7 个国家的专家——进行了约 14 项个案研究，以对 INPRO 成套方法的适用性、一致性和完整性进行测试并提供反馈。根据该反馈编写的本报告阐述了经过改进的 INPRO 成套方法，并标志着 1B 阶段（第一部分）的结束。

本摘要从讨论可持续发展概念以及能源在该概念中的重要性开始，对本报告的内容进行简要介绍。

1987 年的布伦特兰报告（Brundtland Report）即《我们共同的未来》提醒世界注意到，努力使经济实现持续发展，同时又不耗尽自然资源或损害环境的紧迫性。这份由一组国际政治家、公务员、环境和发展专家撰写的报告，将可持续发展定义为：

既满足当代人的需求，而又不危及后代人满足其自身需求的能力的那种发展。

《布伦特兰报告》认为，确保全球公平将需要实现经济增长，并认为只有在保护环境和节约不可再生资源的前提下实现的增长才是可持续的。该报告还认为，实现全球公平和可持续增长将需要技术变革和社会变革。

在《布伦特兰报告》之后的会议和报告中，能源在实现可持续人类发展中的根本重要性已得到重视。能源在可持续发展的每个领域都发挥重要作用：经济、社会、环境和制度。例如，能源服务是支撑经济活动的基础，能使食品和住房等基本生活需求得到满足。通过改善教育和公共健康，能源服务还能为社会发展做出贡献。此外，还能以有益于环境的方式获得现代能源服务，例如通过减少森林砍伐和降低由效率低下的器具和工艺所造成的污染。但这其中可能存在某些矛盾。可持续发展就是要在这些矛盾中寻找适当的平衡。

可持续性的总概念以及对可持续能源概念的具体考虑已被纳入到 INPRO 目标中，并已整合进 INPRO 成套方法。随着 INPRO 的进行，其活动将继续从与可持续性相关的 IAEA 和联合国的一般性活动中受益并接受指导。预计 INPRO 的成果将是 IAEA 及其成员国为促进可持续能源的全球发展所做出的重要贡献。

确保安全能源供应的可靠性是政府对国家安全和经济增长所肩负的最终责任之一。国家环境和政策将决定确保世界总体能源安全、全球经济增长、以及迎接实现可持续发展所面临的挑战所必需的燃料组合结构。为了在可持续性的总框架内解决与确保可持续能源供应所需的 INS 的发展和推广利用有关的具体问题，

INPRO 组建了若干任务组，专门负责开发在下述领域评估 INS 的方法：经济、安全、环境、废物管理、防扩散和基础结构。通过依次关注上述每一个专门领域，INRPO 成套方法确保了给定的 INS 考虑了可持续性的 4 方面内容，而且评估内容十分详细，足以树立对 INS 潜力的信心：该 INS 能为可持续能源供应做出贡献并因此能够满足可持续发展的总目标。此外，此类评估结果还为制订支持某一给定的系统或其组成部分的发展和推广利用的战略以及必要的短期、中期和长期研究、开发和验证（RD&D）计划提供了重要的输入。

根据定义，INPRO 中的 INS 包括能够使核能为 21 世纪的全球能源供应做出重要贡献的一切系统。在这种情况下，除创新型设计外，未来系统还可能包括核装置的渐进型设计。渐进型设计是一种通过从小规模到中等规模的改动，来对现有设计进行改善的先进设计，并重点强调保持设计的可证实性，以将技术风险降至最低。创新型设计是一种为在选定领域实现性能突破而在设计方案或系统配置中采用了与现有实践不同的基本概念的先进设计。

INPRO *评估方法*可提供用于下列目的的工具：

- 筛选 INS，以评价其是否满足下述目标：即确保核能能以可持续的方式为满足 21 世纪的能源需求做出贡献；
- 比较不同的 INS 或其组成部分，以便找到能满足某一 IAEA 成员国需求的优选或最优的 INS；以及
- 确定改进 INS 现有组成部分性能和/或开发新组成部分所需的 RD&D。

INS 评估者可能仅对一整套 INS 中的某一组成部分（例如用于发电、或海水淡化的反应堆）或其中的若干组成部分感兴趣。不论他的具体兴趣在哪里，评估者都必须对系统的所有组成部分进行评价，以便形成对系统的整体看法，并以此来确保所感兴趣的组成部分和相应的整体系统是可持续的。

评估工作需要有精通 INPRO 各领域专门知识，并充分了解包括 INS 在内的核设施的人员参与，以使全面评估工作能够顺利进行。应当将此类评估的结果提供给所有的利益相关者，而不是仅提供给核专家。但是，对于提交给非核专家的结果，其格式和措辞必须满足利益相关者的要求，而这目前仍然是个有待解决的问题。

INPRO 为每一个相关领域规定了一套“基本原则”（BP）、“用户要求”（UR）和“准则”（由“指标”和“可接受限度”组成）。在 INPRO 层次结构中，处于最高层次的是基本原则，这是为开发 INS（或设计特性）提供广泛指导的总规则。

在 INPRO 的所有领域（经济性、环境、安全、废物管理、基础结构和防扩散）中，必须对全部的基本原则都加以考虑。用户要求是某种 INS 获得用户接受必须满足的条件。用户指的是范围很广的各种团体，包括投资者、设计者、工厂运营者、监管实体、当地的各种组织和主管部门、中央政府、非政府组织（NGO）和媒体、以及能源终端用户（例如公众和企业等）。通过制订涵盖内容广泛的用户要求，INPRO 试图确保 INPRO 评估工作对所有利益相关者的利益和观点都加以考虑。需要一套（或多套）准则（CR），以便确定既定用户要求是否得到满足及其满足的程度如何。指标可能基于某一单个参数、一个综合变量、或一种状态陈述。

基本原则、用户要求和准则的基础广泛。它们是在考虑国家、地区和世界发展趋势时渴望实现、并且在技术上多半可以实现的理想状态。由于在评估工作中难以对技术发展进行同步考虑，因此 INPRO 对目前的发展趋势进行了外推。成员国可以自由并实际上应当在许多方面（例如经济性与基础结构）针对国家或地区或技术对特定的准则和用户要求做出规定。对于某些可接受限度，INPRO 在本报告中提供了建议值，例如在限度需要获得国际认可和应用的安全领域。从长远来看，除安全领域外，预计还将在防扩散、环境和废物管理推荐已取得国际共识的可接受限度。目前正在编写的 INPRO 手册将向 IAEA 成员国提供更多有关选择指标和可接受限度的更详细信息。

在 INPRO 的第二步即 1B 阶段（第一部分）工作结束时，为了供感兴趣的 IAEA 成员国使用，已经对筛选评估和比较评估所用方法开展了充分的开发工作。在另一方面，预计在使用 INPRO 成套方法的过程中所产生的反馈将会使该成套方法得到进一步改进。实施 RD&D 评估的方法仍在开发之中，本报告规定的方案预期将在 INPRO 下一步即 1B（第二阶段）工作中得到进一步开发。

基本原则、用户要求和准则在本报告的第 4—9 章进行了详细阐述，下文将对它们进行简要介绍。

在经济领域，已经阐明了一条基本原则，即 INS 对可持续发展、能源及相关产品和服务的贡献必须是消费者买得起并可利用的。如果要使能源和相关产品及服务可以承受，则向消费者提供的价格必须能够与低成本/价格的备选方案竞争。如果要使能源和相关产品及服务是可利用的，则需要开发和推广用于供应能源和相关产品的系统。开发和推广应用创新型能源系统需要投资，而且必须使投资者（不论是企业还是政府）相信他们的投资选择是正确的。投资的备选方案可

能是正在寻找投资以进行开发或推广应用的其他能源技术或属于非能源技术领域。因此，如果要进行开发和推广应用，INS 就必须在投资的竞争中胜出。在不同的市场和地区以及开发和推广应用周期的不同时间和阶段，投资者也许各不相同；在确定投资的吸引力方面，不同的因素可能具有不同的重要性。然而，在任何情况下，必须创造一个良好的经营实例。

考虑到核技术的性质，人们认识到，政府的政策和行动（在一些成员国，政府可能参与投资）必将对投资者的决策有重大导向和影响，既可影响其决定是否在开发时投资，还可影响其在技术推广/选购时的投资决定。对于私人部门而言，投资在经营实例中的利润率和回报率是关键因素。因此，如果给消费者的价格具有竞争力，同时投资者也能得到具有吸引力的回报，则其生产成本与其他备选方案相比一定具有竞争力。要具有成本竞争力，就必须考虑和管理所有组成部分的费用（例如造价、运行和维护费用、燃料费用等），以保持总的单位能量成本的竞争力。燃料费用的限度是指燃料循环设施（包括矿山、燃料加工和富集设施、燃料后处理设施以及设施退役和对这些设施产生的废物进行长期管理）的建设和运行费用的限度。

INS 生产能源的成本竞争力将有助于投资者建立信心，即增加对 INS 投资的吸引力，同样，具有竞争力的财务数字（例如回报率）也能增加投资者的信心，这些财务数字至少应当与有竞争力的能源资源的相应值相当甚至更好。还必须做出相应判断，在给定的预期投资环境中能否筹集到执行项目所需资金，并考虑其他投资方案以及要求共享可用资产的其他优先事项。此外，在参考其他能源工程中的投资风险的同时，投资风险必须是可接受的。

考虑到未来的不确定性，INS 从理论上说应当十分灵活，足以为将来的逐步发展和改进留有余地，以便能尽可能为各种可能的未来和市场提供具有竞争力的能源。因此，除了 INS 具有总体适应性外，还希望具有对 INS 的特定组成部分进行调整的能力，以便能适应不同规模的模块、不同的市场变化和增长情况，采用不同的燃料以及满足不同的能源应用和不同国家/地区的需求。在评估某一组成部分或整套组成部分的灵活性时，应当考虑该组成部分或整套组成部分与 INS 其他组成部分之间可能存在的协同作用。

在核设施安全领域，INPRO 认识到，有关部门在 INPRO 之前已经完成了大量有关制订安全要求的工作，这些安全要求已登载在美国电力研究所（EPRI）的《先进轻水堆的电力公司要求》、欧洲电力公司的《欧洲电力公司要求》、IAEA

的安全标准系列丛书（例如安全指南和国际核安全咨询组（INSAG）文件）等文件中。在 INPRO 中制订的安全原则和要求都是基于对目前发展趋势的外推，并试图涵盖发展中国家和转型中国家的潜在利益。对于核反应堆，其基本安全职能是控制反应性、从堆芯排除热量以及包封放射性材料和屏蔽辐射。对于核燃料循环装置，其基本安全职能是将工况控制在次临界状态、控制化学反应、排除放射性核素的衰变热以及包封放射性和屏蔽辐射。为了保证 INS 能履行这些基本安全职能，INPRO 已规定了 4 项基本原则，但预计以前的工作成果在很大程度上也是适用的。

INPRO 预计，除了在纵深防御战略中的不同防护层次具有更强的彼此独立性，以及更加强调内在安全特性和非能动安全特性外，INS 将会把经加强的纵深防御作为其基本安全方案的组成部分。其最终目的是防止、减少和包容放射性释放，以使 INS 的健康和环境风险达到与用于类似目的的工业设施相当的水平，从而无需对 INS 采取除了为任何工业设施制订的一般应急措施外的场区外搬迁或疏散措施。必须在推广应用 INS 之前使用诸如大规模工程试验设施（可能包括中试装置和原型装置）来开展 RD&D 工作，以便能增加对装置特性的了解以及提高安全性分析程序的能力，且其程度应能达到与对现有装置相同的水平。INS 的开发工作应当以考虑了整体燃料循环的风险和影响的全寿期分析为基础。安全性分析将综合使用确定论评估和概率论评估，其中包括最佳估计和不确定性分析。

在许多国家，环境保护是工业活动审批过程中的一个重要考虑因素。而且环境保护也是可持续发展概念中的中心议题。有初步证据证实的案例表明，由于可在对大气、水和占用土地方面造成相对较小负担的前提下提供很多必要的能源，因此核电能为可持续发展提供支持。核电的进一步推广利用将有助于减轻由其他能源生产方式（尤其是燃烧化石燃料）造成的环境负担。INPRO 已规定了 2 项与环境有关的基本原则：第一项涉及由核能造成的环境效应的可接受性；第二项涉及 INS 在未来以可持续的方式提供能源的能力。

当代人不得危及子孙后代满足其自身需求的能力这一原则，要求为未来保留一个健康的环境。尽管核能在满足全球能源需求方面具有重要的环境优势，但必须避免或有效缓解核燃料循环的不同环节可能对环境产生的潜在不利效应，以便使核能可在长时间内实现可持续性。环境效应包括：环境的物理、化学或生物学变化，对人、植物和动物的健康效应，对人、植物和动物的生活质量产生的效应，经济效应，资源的使用/耗尽，系统的影响以及对环境的其他影响共同产生的累

积效应。不仅需要考虑放射性和非放射性效应，还需要考虑不同系统组成部分和不同环境应激物所产生的效应的相互抵消和增效作用。

要实现可持续性，系统就不得在其既定的寿期内耗尽重要的资源。这些资源包括易裂变/可转换材料、水（当供应量有限或品质恶劣时）及其他重要材料。系统还应至少像其他可接受的备选方案（核与非核）那样有效地使用这些资源。

在对拟议能源系统的环境效应分析中，必须对所有相关因素（源项、应激物、途径、接受体和终点）进行说明。此外，还需要通过考虑全面收集能源系统的工艺、活动和设施在其寿期所有阶段可能产生的环境效应，将拟议技术的环境性能作为一个整体进行综合评价。

与核设施安全相比，由于*废物管理*涉及更长的时间跨度，在许多情况下还涉及不同的源项和途径，因此这一议题将在单独一章中加以介绍。IAEA 在《放射性废物管理安全基本法则的原则》中为放射性废物管理规定了 9 项基本原则。目前已经从这 9 项基本原则中对 INS 推导出了 4 项 INPRO 基本原则。这 4 项基本原则是：必须通过设计尽可能降低废物的产生量；不论影响可能发生在何时何处，废物管理都必须确保对人的健康和环境的保护达到可接受水平；废物的管理工作不得对后代造成不应有的负担；以及必须考虑所有废物产生和管理步骤之间的相关性。已根据这些原则导出了 INPRO 要求：将废物产生量降至最低，尤其关注那些含有将在最终处置库环境中发生迁移的长寿命有毒组分的废物；限制废物产生的辐射照射和化学品照射；对所有废物都指定了永久的安全终态，并为尽早实现这种状态而转移废物；对废物进行分类并确保中间步骤不会阻止或妨碍终态的实现；以及在寿期中积累管理所有废物所需的资产，以便能涵盖在各个阶段所累积的责任。此外，预计 IAEA 以前在废物管理方面获得的工作成果也将在一定程度上得到应用。在包括长寿命裂变产物和次锕系元素的分离和嬗变、以及长期人因分析等诸多领域，建议开展 RD&D 工作，以促进针对需进行长期制度控制的废物管理系统的长期风险评估。

在设计未来的核能系统时，应当考虑此类系统被滥用于生产核武器的可能性，这一点十分重要。这一事项是在国际不扩散体系——IAEA 保障体系的基本组成部分——中的关键考虑事项之一。INPRO 的规定为将防扩散纳入到 INS 中提供了指导。INPRO 在该领域的大部分成果都建立在于 2002 年 10 月在意大利科摩、以及随后于 2004 年 3 月在大韩民国济州、2004 年 9 月在奥地利维也纳召开的各次会议上达成的国际共识基础之上，并考虑了来自以上会议中个案研究的

反馈。防扩散是需要将内在特性和外加措施结合在一起。内在特性来自于 INS 的技术设计，其中包括那些可促进外加措施实施的特性。外加措施基于国家对核能体系做出的决定和承诺。

内在特性包括下述技术性能：a）降低核材料在生产、使用、运输、贮存和处置期间对核武器计划的诱惑，其中包括同位素含量、化学形式、体积和质量以及辐射特性等材料参数；b）防止或限制核材料的转移，其中包括将核材料限制在入口有限的地点，以及那些由于其尺寸、重量或放射性而需要在严格监控情况下移动的材料；c）防止或限制进行直接使用材料的未申报生产，其中包括用于防止未经申报就在反应堆堆芯或其附近通过辐照生产目标材料而设计的反应堆，能够防止反应堆使用未申报目标运行的具有小反应性裕度的反应堆堆芯，以及难以进行改动的燃料循环设施和工艺；以及 d）便于核材料衡算和核查的相关措施，其中包括保持信息的连续性。外加措施共分为下述 5 类：a）国家的承诺、义务和政策，例如《不扩散核武器条约》和 IAEA 保障协议，以及保障协议的附加议定书；b）进口国和出口国间有关将核能系统专门用于商定目的的协议；c）控制接触核材料和技术的商业、法律或制度安排；d）由 IAEA 实施的核查措施，或者地区、双边和国家核查措施；以及 e）用以处理违反上述规定事宜的法律和制度措施。

INPRO 已制订了一些基本原则，要求在 INS 的全部寿期中都使用防扩散特征和措施，并且内在特性和外加措施都必须得到使用。遵守这些基本原则就要求：国家的承诺和义务是充分的；在被转用于核爆炸装置的适应性方面，核材料的诱惑力很低；核材料的转移难于进行，并且可被探查到；在 INS 中采用了多重特性和措施，并且涵盖了为核武器计划而获得裂变材料的可能途径；在设计和建设期间对内在特性和外加措施的综合使用进行了优化，以便提供具有成本效益的防扩散。需要在许多领域，尤其是在为已确定 INS 的防扩散性能制订评估程序的过程中使用 RD&D，并考虑 INS 的相对成熟水平和可以获得的资料的详细程度。

除了技术要求外，还有许多对 INS 的潜在用户十分重要的问题。其中的许多因素将促进或阻碍与核电基础结构相关（国家基础结构和以国际协议为基础）的核电在未来 50 年的推广应用。核电基础结构由成功推广应用和运行核电厂所需的全部特性/基础条件组成，其中包括法律、制度、行业、经济和社会特性/基础结构。全球化和发展中国家对未来世界能源市场的重要性都表明，需要在国家和地区范围内对基础结构进行改造，以促进在发展中国家推广应用核电系统。

在对可持续能源的需求不断增长的世界中，法规和办证程序的协调一致会有利于核技术的应用。这种在不同市场间的协调一致，不仅对用户和投资者有利，而且也有利于技术的供应者和开发者。本报告规定的这种能满足针对安全、环境、废物管理和防扩散领域的基本原则、用户要求和准则的创新型反应堆的开发，将能促进该协调工作的开展并可能改变核能生产的监管方式。例如，“除了出于类似目的为任何工业设施制订的一般性应急措施外，无需在场区外采取搬迁或疏散措施”这一条，就可能会简化对办证的要求。在发展中国家以及那些核知识基础和设施尚不高度发达的国家中，建立地区或国际的办证程序以及相应的监管机制和组织，可发挥重要作用。

此类考虑已使 INPRO 确定了一项基本原则，即应通过地区和国际的安排，提供能够使任何希望采用 INS 供应能源和相关产品的国家无需在本国的基础结构上进行过多投资的多种选择。与此相关的用户要求，认识到了为下述目的而建立国家法律体系的必要性：计划建造 INS 的国家拥有充足的行业和经济基础结构；采取措施确保获得公众的接受；有足够的人力资源可供安全运行使用。全球化带来了利用更大范围可共享资源的机会，而不只限于维持本国核能系统所依赖的由多个科学与工程学科的组成的技术能力范围。目前已经认识到，在将核技术用于能源供应的同时，需要对国家能力进行投资——至少使国家能成为一个懂行的购买者。之所以这样讲，是因为国际上有范围广泛的服务和产品可供利用（包括运行甚至监管方面的服务），因此各国在考虑所需的先期投资方面拥有多种选择。

在进行创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）的评估时，评估人员必须考虑一个或多个参考能源情景。例如，如果评估人员的眼光集中在他所在州（省）的能源供应情况，那么他就要考虑他本国的能源情景（或者基于他本国内的某个地区更加地方化的情景）。此国家情景的预期也需要全球的和/或地区的考虑因素，例如，全球的铀需求量、后处理能力等等，因此也必须采用地区的或全球的情景中的某些要素。如果评估人员对全球的能源供应状况（将它作为可持续发展的一个组成部分）感兴趣，那么为了得出全球的情景，他必须利用将各个地区和国家组考虑在内的涉及范围更广的情景。此类情景将使用模拟工具，其中包括 IAEA 目前已经开发出来的现有工具以及 INPRO 正在开发的工具，尤其是 DESAE 程序。

目前正在开发的 DESAE 程序，能够计算某反应堆组合在不同时间为满足特定核能供应要求所需要的财务资源和物资资源。因此，用户能够研究拟议系统的

实用性和材料平衡（例如随着时间变化的铀需求、废物的增长、钚的再循环等）。该程序目前尚处于开发的初期阶段。进一步开发将把该程序的应用范围扩大到用于能源供应的其他资源，并使其能与 MESSAGE 等 IAEA 程序结合使用。

一般而言，此类模拟工具的使用被视为能源规划工作和 INPRO 的重要组成部分。随着开发工作的继续，其使用将被纳入到 INPRO 成套方法中。

总之，本报告介绍了一种用于确定某一核能系统是否可持续的 INS 成套评估方法，这套方法已得到成员国的测试和确认。INPRO 目前已完成了实现其首要目标即“帮助确保核能在 21 世纪以可持续的方式可供利用”的重要步骤；在下一步工作即 1B 阶段（第二部分）中，可以预计将从 2005 年年初开始使用该成套方法对整套 INS 进行整体评估。这一步工作的一项重要成果将是编写完成旨在帮助成员国使用 INPRO 成套方法的《用户手册》。对这本手册的编写工作而言，来自首批评估工作的反馈信息将是无价之宝。此外，还将建立 INS 评估的数据库。

随着来自评估工作的反馈信息的增加，预计 INPRO 成套方法和手册将得到进一步完善。此外，还可预计该成套方法将被用于确定不同成员国感兴趣的系统在技术和基础结构方面的互补性和增效作用，并将因此有助于确定通往以不同国家和地区组成部分为基础的全球可持续核能系统的可能途径。因此，此类评估将是完成 INPRO 第二个目标即“汇集全部成员国的力量，共同考虑国际和国家行动以实现所期望的创新”的重要步骤。

1B 阶段第二部分及其后的第 2 阶段（参见附件）的工作将涉及核能领域的所有利益相关者。这样一来，INPRO 将通过提供一个论坛实现它的第三个目标即“建立一种使所有利益相关者都参与的环境”。在这个论坛中，来自工业化国家和发展中国家的专家和决策者们，除了讨论 INS 在 21 世纪中的发展和推广应用问题之外，还可以讨论与制定核能规划有关的技术问题、经济问题、环境问题、防扩散问题和社会问题。

第 1 章

绪　论

1.1. INPRO 的任务

INPRO 的任务是：

- 为工业化和发展中国家的专家和政策制定者提供不仅可以讨论 INS 在 21 世纪的发展和推广应用，而且还可以讨论与制定核能规划有关的技术问题、经济问题、环境问题、防扩散问题和社会问题的论坛；
- 开发相应的分析工具，用以分析 INS 在全球、地区和国家的基础上以可持续方式满足能源需求所需要的作用和结构；
- 开发评估 INS 的成套方法，并将其用于建立一套针对此类评估的国际上认可的 IAEA 的建议；
- 帮助协调 INS 发展和推广应用方面的国际合作；
- 特别关注对 INS 感兴趣的发展中国家的需要。

INPRO 方法将为选择地方的、地区的和全球的核电基础结构的发展道路提供支持，允许确定其必不可少的组成部分，并将有助于组织改进现有的组成部分并开发 INS 中缺失的组成部分所需要的研究、发展和验证（RD&D）（将有助于确定可持续核能系统在地方、地区和全球的核电基础结构方案）工作。无法避免的是，要考虑各国（包括目前尚无核电的国家在内）有关核电发展和应用的诸项要求和条件未来可能会发生变化。对于这些国家来说，INPRO 成套方法将有助于确定其未来的能源需求以及满足需求的途径。

以可持续方式满足 21 世纪能源需求（可持续的能源供应），将需要大规模地推广应用核电以及其他能源。核电有潜力在全球范围内以直接或间接的方式提供高效费比的、可靠和安全的能源供应。特定能源技术的开发者需要使用适当模型工具探索该技术的真实能力。必须考虑改善现有设施的潜力、对它们容许的推广规模限制以及它们消耗资源的速率。还必须记住，一个新想法的实现（从概念阶段到具备大规模实施能力，对全球、地区甚至地方的可持续能源供应有显著影响）可能需要相当长的时间。在这方面，应该注意的是，核电是一种实际上可提供无

限能源资源的能源技术。它的推广应用可以减少环境污染和需要管理的废物量（包括温室气体在内）。

这套 INPRO 方法的主要特征是，它提供了一种对有关下述诸项信息作系统化说明的工具：总的核能供应潜力和不同供应选项的潜力，使用核能的重要性；社会能源发展的选择；以及在人力、资源和时间方面的相关开发投入。正如在创新型燃料循环和反应堆[1-1]的国际会议上所提出的那样，“INPRO 成套方法是湍流环境下的导航员”。INPRO 成套方法将为核能系统在地方、地区以及全球范围内有效的开发和推广应用提供极大帮助。

在展望未来时，反思过去也有益处。为此，在下一节中，将简单讨论到目前一直影响核电的开发和使用的因素。

1.2. 核电简史

核电在其较短的仅仅 50 年的历史中，有关核电的开发和利用的预期和预测在相当多地区发生过戏剧性变化，即随着时间推移从积极变为悲观。特别值得注意的是一些早期采用核电的国家也发生了这种变化。鉴于这些变化，值得总结一下那些已经取得的科学和技术进步以及目前人们已经了解的一些基本制约因素。

过去 50 年积累的与核电有关的科学和技术信息量是巨大的。它包括基础核科学、化学、热工水力和材料科学数据，以及在几十个国家设计、建造、测试和运行几百个不同类型的核设施中得到的信息。基于这些知识，我们能强调：

- 铀和钍三种天然同位素（铀-235、铀-238 和钍-232）的已知储量具有能确保全球能源供应，并足以满足任何合理预测的数百年全球能源需求的潜力。
- 这种能源可以通过至少已在中试装置层次上得到检验和确认过的技术加以提供。

多年前人们就已经知道了这一点，因此在 20 世纪 70 年代对截至到 2000 年的全球核电装机容量的预测值是很高的。但是，这些预测值比实际结果高出了 1 个数量级。尽管如此，它们确实反映出核电发展的真正潜力。

在 20 世纪 70 年代头 5 年，核电容量增长最快，平均每年增长 30%。但是在此之后的 5 年里，由于一些原因，增长开始变慢。来自于人数日益增加的反核者（主要是环境保护主义者）的挑战不断增加，这些挑战延长了办证时间并且有时需要更改设计。这就增加了成本，延长了成本回收期，并使融资变得更加复杂。

另一个导致高成本的原因只不过是，一些电力公司、设备供应者、承包商和监管者在很多情况下，不能应对这种新的复杂技术在管理方面的挑战。20 世纪 70 年代的通货膨胀和能源价格的上升，在抑制了电力需求的增长（因此抑制了电力公司的收入）的同时，增加了电力公司成本。

在接近 20 世纪 70 年代末期时，美国的核电订单就完全没有了，并且至今没有恢复。最明显的原因是 1979 年的三里岛事故——民用核电厂的第一个重大事故。它对附近居民乃至整个西方世界的心理影响是巨大的。对电厂本身的损害以及核电产业声誉的损害也是如此。

然而，从全球来讲，核电在电力中的份额继续增大，甚至在核扩展速度变慢时也是如此。1981 年核电份额为 9.1%。1987 年达到 16.2%。然后，当核扩展速度减慢到与整个电力扩展速度相当时，核电份额达到有效的稳定水平。在过去 16 年里，核电增长与电力增长相当，2003 年，在全球电力中核电份额为 16.1%。

在这期间，日本、大韩民国和几个发展中国家有适度的增长。然而，北美、西欧、俄罗斯联邦和东欧几乎没有容量增长。两个原因分别是：1986 年的切尔诺贝利事故，以及很多国家放宽了对其电力市场的管制。切尔诺贝利事故扩大了反对核电的阵营，特别是在欧洲；而对在管制市场中积累的“显著”过剩容量的放宽管制，降低了电价（从而降低了电力公司收入），并使得电厂投资面临更大的风险。过剩容量减少了对任何种类的新容量的需求，强调快速稳定的收益又使核电“前期投资大”的成本结构（初始造价高而运营成本低）成为一个重大的缺陷。这些差异，再加上作为清洁燃料的天然气在 20 世纪 90 年代大部分时间里持续保持低价格，使得一些新的投资从核电转移，而且其中大多数投资转向天然气。

具有讽刺意味的是，切尔诺贝利事故、放宽管制、以及核工业的联合反而使核电厂的可利用因子上升，从而使全球核发电量的增长速度在 20 世纪 90 年代超过了全球核电装机容量的增长速度。切尔诺贝利事故促进世界各国对核电厂的管理和安全工作进行改善，从而导致核电厂的可利用因子上升。而在放宽管制的市场上，较高的可利用因子直接转化为运营者的利润增加，这为核电厂的改进工作提供了强有力的财政刺激。

1.3. INPRO 的发起

正如布伦特兰委员会的报告、里约宣言和其他文件中表明的那样，国际上对可持续发展概念非常感兴趣并予以支持。这个概念包括了对发展可持续能源供应

的要求。本报告第 2 章“INPRO 与可持续性概念”将对可持续发展概念进行更详细介绍。政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 1996 年组织编写的《排放情景特别报告》（SRES），根据 40 个参考情景探讨了 21 世纪的能源需求。SRES 报告中的情景明确地预测了：能源需求增长中间因子为 2.5，电力需求增长的中间因子约为 5。报告进一步表明，要保证 21 世纪能源供应的可持续发展，就需要对核能进行推广应用。因为没有核能，其他能源不大可能满足预测的能源需求，比如：化石燃料（由于温室气体排放），或可再生能源（由于供应的不连续性以及占用土地问题）。然而，正如前面一节所表明的那样，目前运行的核系统的可持续性受到公众和一些决策者的质疑，原因是存在一些与安全、核废物处置和核武器扩散有关的问题。

为了解决这些问题并保证核能持续发展，根据 IAEA 大会的决议（GC(44)/RES/21），2000 年发起了创新型核反应堆和燃料循环的国际项目（INPRO）。该项目依据的是由俄罗斯联邦提出、并获得诸多 IAEA 成员国支持的一项倡议：联合广大的国际力量开发具有一定基本特性的创新型核反应堆和燃料循环技术。这些特性包括：

- 实际上无限的燃料资源；
- 排除严重事故；
- 对天然辐射平衡无干扰的环境友好的能源生产；
- 堵塞与核电有关的核武器扩散途径；
- 经济竞争力。

所预测的全球能源需求，以及目前人们对在满足该需求中核电作用的兴趣的日益增长，都表明这些努力的及时性。在使用其全部专门知识帮助其成员国进行这项工作中，IAEA 处于独一无二的位置。

对 INPRO 的指导由一个指导委员会提供。这个指导委员会第一次会议于 2001 年 5 月召开。截至 2004 年 12 月，INRPO 有 22 个成员：阿根廷、亚美尼亚、巴西、保加利亚、加拿大、智利、中国、捷克共和国、法国、德国、印度、印度尼西亚、摩洛哥、荷兰、大韩民国、巴基斯坦、俄罗斯联邦、南非、西班牙、瑞士、土耳其和欧洲委员会。成员通过提供资金、专家和研究为该项目作贡献。

1.4. INPRO 总目标

INPRO 总目标（见参考文献[1-2]，第 1.2.2 节）是：

- 帮助确保核能可在 21 世纪以可持续的方式对满足能源需求做出贡献；
- 将所有感兴趣的成员国（技术所有者和技术使用者）组织到一起、共同考虑在核反应堆和燃料循环中为实现所期望的创新所需要的国际和国家行动。这里所说的创新是：它们将使用合理的和具有经济竞争力的技术，并——尽可能地——以具备内在安全特性的系统为基础，将扩散风险和对环境的影响减至最低；
- 建立一个所有利益相关者都能参与的环境，使得这些利益相关者能对现有的制度活动以及在国家和国际层面上正在实施的倡议施加影响，从中汲取经验，并且对其有所补充。

1.5. INPRO 目标的实现

为实现其目标，INPRO 已经采取一种阶段性方案（参考文献[1-2]，第 1.2.3.1 节）。

第一步（称为 1A 阶段），INPRO 在下列领域建立了 8 个任务组：

- 核电的前景与潜力（资源与需求）；
- 经济性；
- 环境；
- 废物管理；
- 核设施安全；
- 防扩散；
- 基础结构（交叉事项）；
- 评估方法。

这些任务组设定了要求的层次结构，包括核能系统为实现可持续性的总体目标必须达到的基本原则、用户要求和准则。此外，还初步开发出了评估核能系统的 INPRO 方法。TECDOC-1362 列出了 1A 阶段的工作结果[1-2]。

在被称为 1B 阶段（第一部分）的第二步中，INPRO 安排了一些国家工作组或专家进行若干项个案研究，以校核和检验成套方法的适用性、一致性和完整性。（备注：这些个案研究的内容将在下一节中简单描述）1B 阶段（第一部分）的成果是已经被改善了的 INPRO 成套方法。本报告对该阶段的成果进行了介绍。

INPRO 成套方法提供了这样的可能性：在评估中考虑成员国（包括发展中

国家和发达国家）地方的、地区的和全球的边界条件和核设施在 21 世纪计划推广应用的时间框架。术语“核设施”包括从前端（如采矿）到后端（如核废物终态设施）的核系统的所有设备，并包括核能的所有应用（如发电、海水淡化、热电联供、集中供热、制氢等）。某一个或多个既定的核能系统的评估，可由一个单独的成员国或具有共同边界条件（如地理区域、可比的工业能力或所需能量系统的规模等）的一组成员国来进行。在全球的基础上对核能系统的某些方面（如国际燃料循环中心）进行评价也许是最佳的。

通过建立一套确定核能系统是否是可持续的方法，INPRO 就实现了其**第一个目标**，即“帮助确保以可持续的方式提供核能”（全文见上节）。

在被称为 INPRO 1B 阶段（第二部分）的下一步中，将计划进行一些完整核能系统的诸多评估工作，并且作为这个阶段的成果，将确定使这些系统或其中一部分具有可持续性所必需的 RD&D 工作。

进行评估和最终确定必要的 RD&D 短期、中期和长期目标（考虑已规划的核能系统推广应用时间表），将涉及到所有对核能感兴趣的成员国。这样，预计 INPRO 将达到其**第二个目标**，即“汇集全部成员国的力量，共同考虑国际和国家行动以实现所期望的创新”（全文见上节）。

在下一步（被称为第二阶段），根据成员国的决定，IAEA 将通过 INPRO 协调在 1B 阶段（第二部分）确定的 RD&D 任务的执行工作。对发展工作的这种协调将涉及核能领域的所有利益相关者。这样，将达到**第三个目标**“建立一种使所有利益相关者都参与的环境”（全文见上节）。

1.6. INPRO 完成的国家和个人个案研究

在 1B 阶段（第一部分），进行了一些个案研究，其目的是测试和验证 INPRO 成套方法并确定该套方法的必要改进。国家个案研究使用了各种核装置进行验证，如表 1.1 所示。

应该提到的是，虽然国家个案研究以具体的核装置为基础，但这些研究不是对该装置本身的实际评估，而是被用来测试和验证 INRPO 成套方法。

涉及核能的个人个案研究如表 1.2 所示。

表 1.1. 进行国家个案研究（NCS）的成员国和所考虑的核装置表

（进行国家个案研究的）成员国	（用于验证 INPRO 成套方法的）核装置
阿根廷	CAREM-X 系统（CAREM 反应堆和 SIGMA 燃料浓缩方法）
中国	高温气冷试验反应堆 HTR-10。
捷克共和国	针对熔盐反应堆的具体观点，评价和对比未来技术。
印度	先进的重水慢化反应堆（AHWR）及其燃料循环。
大韩民国	在 CANDU 中直接使用压水堆燃料（DUPIC 燃料循环）。
俄罗斯联邦	BN-800 型钠冷快堆的创新型系统的方案。

表 1.2. 进行个人个案研究（ICS）的个人和个案研究课题

研究人员/研究单位/国家	（个人个案研究包括的）课　题
SUBBOTIN, S. /库尔卡托夫研究所/俄罗斯联邦	评估现有 INPRO 成套方法在评价具有小型反应堆机组的核电系统时的适用性并确定其应加强的方向。
KOROVIN, Y. /奥布宁斯克国家核电工程大学/俄罗斯联邦	评估现有 INPRO 成套方法在今后评价不同类型的无碳能源系统（包括 ADS，聚变和可再生能源）时的适用性并确定其应加强的方向。
GAGARINSKY, A. Y./库尔卡托夫研究所/俄罗斯联邦	评估现有 INPRO 成套方法在评价基于使用创新型技术与国际燃料循环中心的全球和/或地区核电系统时的适用性并确定其加强方向。
TSURIKOV, D./库尔卡托夫研究所/俄罗斯联邦	现有 INPRO 成套方法在评估多产品核能系统时的适用性。
TSIBULSKY, D./库尔卡托夫研究所/俄罗斯联邦	定量评估核能系统关键指标的相互作用模型。
WIESENFELD, B/BWM 委员会/法国	通过评估和分析各种具有快中子谱的系统来确认和更新 INPRO 成套方法。
RAJ, B./英迪拉・甘地原子研究中心/印度	国际燃料循环和带有快中子增殖反应堆的闭式燃料循环方案。
CIRIMELLO, R., BERGALLO, P./阿根廷原子能委员会/阿根廷	自主核燃料循环。

个案研究采用了通用的报告结构（详情见参考文献[1-2]，第 5.5 节），即：

- 对所评估的核系统的简要介绍；
- 对 INPRO 成套方法的一般评论；
- 对每项基本原则、用户要求和准则进行的具体评论。

个案研究报告为改善 INPRO 成套方法提供了很多有价值的建议，如 TECDOC-1362 中描述的那样。根据成员国的要求，IAEA 可以以光盘的形式提供个案研究报告的全文。

下一节总结了与 TECDC-1362 相比的主要变化。

1.7. 与 IAEA-TECDOC-1362 相比的主要变化

根据上述讨论的个案研究和有关核能领域的利益相关者（如监管者、企业等）参与的一些咨询会议的结果，本报告被作为参考文献[1-2]的续篇来编写。它与参考文献[1-2]的不同之处如下：

- 增加了一个名为“INPRO 与可持续性概念”的新章节，阐述为 INPRO 提供动力与框架的“可持续性”的一般概念；
- 通过对不确定性加以单独处理，对“评估方法”一章的结构进行了调整和内容更新。即：确定了评估的三种类别和汇总判断的几种可能性，以及用于处理 RD&D 近期、中期和长期目标的方案；
- 在有关经济性、废物管理、防扩散和核设施安全的各章中，对基本原则进行了重新阐述并减少了基本原则的数量，以便消除重复并增加基本原则与相关的用户要求（UR）间的相关性，；
- 增加了基本原则、用户要求和准则中所使用的术语解释以及相关背景的介绍；
- 提高了成套方法对燃料循环设施（反应堆除外）的评估能力；
- 在原来被称为“交叉事项”的那一章中加入了用于处理基础结构问题的基本原则、用户要求和准则；该章也改名为“国家、地区和国际的基础结构”；
- 增加一章，介绍可供模拟国家、地区和全球未来能源供需情况使用的工具。

今后，应使用修改后的这套基本原则、用户要求和准则，而不是参考文献[1-2]中描述的那些原则、要求和准则。

1.8. 本报告的概要

下文将简要介绍本报告的各章的内容。

第 2 章介绍可持续发展概念的历史发展。它详细描述能源供应在这个概念中的作用，并且把 INPRO 成套方法与可持续性目标联系起来。

第 3 章解释 INPRO 使用的主要术语，并介绍对 1 个（或多个）核能系统的能力做出判断的程序。此外，还介绍不确定性定量处理方法，以及核开发周期的各阶段，并讨论了三种评估类型。

第 4 章确定了与消费者以及核能项目的可能投资者所要求（这些要求是具有可持续性的核能源系统必须满足的）的能量成本相关的基本原则、用户要求和准则。本章还进一步讨论了“评估方法”一章中介绍的开发周期。

第 5 章确定了对要保证足够的安全，以达到相应的可持续性目标的核能系统的要求。总的方案是增强纵深防御概念，包括（酌情）增加使用内在的安全特性和非能动系统。

第 6 章使用整体处理方法论述了环境应激物（stressor）及其对环境的影响，并确定了对资源的充足性及其有效利用的要求。

第 7 章确定了对以整体的可持续方式管理放射性废物的要求。

第 8 章阐述了达到足够水平阻止核材料转用的要求，强调了对内在特性和外加措施进行优化组合的需要。

第 9 章在强调了发展中国家的核需要的同时，为推广应用和运营核设施所必需的基础结构提供了基本原则、用户要求和准则，并详细地描述了国际核工业界将发生有利于核设施今后推广应用的变化的可能性。

第 10 章介绍正在进行的开发适用的计算机程序方面的活动成果，这些程序可用于探讨与今后推广应用核能系统相关的情景，并考虑到对可持续发展的 INPRO 的要求。

第 11 章总结了 INPRO 1B 阶段（第一部分）的主要成果，展望以后各阶段 INPRO 预期达到的目标。

第 1 章参考文献

[1-1] VELIKHOV, E.P., “Development of nuclear power, 10 points”, International Conference on Innovative Technologies for Nuclear Fuel Cycles and Nuclear Power, 23-26 June 2003,

IAEA, Vienna (2003).
[1-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, Report of Phase 1A of INPRO, IAEA-TECDOC-1362, Vienna (2003).

第 2 章

INPRO 与可持续性概念

2.1. 引言

1987 年的布伦特兰报告[2-1]，即《我们共同的未来》提醒世界注意到，努力使经济实现持续发展，同时又不耗尽自然资源或损害环境的紧迫性。这份由一组国际政治家、公务员、环境和发展专家撰写的报告，将可持续发展定义为：

既满足当代人的需求，而又不危及后代人满足其自身需求的能力的那种发展。

《布伦特兰报告》认为，确保全球公平将需要实现经济增长，并认为只有在保护环境和节约不可再生资源的前提下实现的增长才是可持续的。该报告还认为，实现全球公平和可持续增长将需要技术变革和社会变革。即必须允许发展中国家满足他们在就业、食品、能源、水和卫生方面的基本需求，但是同时，环境和世界资源基础应通过逐渐改变人们发展和使用技术的方式得到保护。

1992 年，在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展会议即“地球峰会”通过的《21 世纪议程》为在 21 世纪取得社会、环境和经济可持续发展提供了蓝图。它阐述了一些地区的社会和环境问题，包括空气污染、滥伐森林、生物多样性丧失、健康、人口过剩、贫困、能源消费、废物产生和运输问题。鼓励所有政府、非政府组织（NGO）、工业和一般公众参与执行《21 世纪议程》。国际可持续发展委员会将监督已承诺参与的国家，并鼓励他们在其国内地方和地区范围推动《21 世纪议程》的落实。

1997 年 6 月召开的旨在回顾《21 世纪议程》进展的联合国大会特别会议强调，能源的生产、分配和利用的可持续状态对于不断提高生活质量是至关重要的。会议还声明，2001 年召开的联合国可持续发展委员会第九次会议（CSD-9）将集中讨论与能源和大气，以及能源和运输有关的问题。为了通报讨论和辩论情况，联合国开发计划署（UNDP），联合国经济社会事务部（UNDESA）和世界能源理事会（WEC）在 1998 年下半年开始编写《世界能源评估》[2-3]。

《世界能源评估》报告（副标题是“能源和可持续性挑战”）分析了与能源供应和利用有关的社会、经济、环境和安全问题，并评估了每个领域的可持续性的选择。它强调了能源在与实现人类可持续发展相关联的经济、社会和环境目标

中的中心作用。报告肯定，那些将导致一个更加公平、更加具有环境效益、经济上更有生命力的世界能源系统是能够建立的。

2001 年在美国纽约召开的可持续发展委员会第九次会议（CSD-9）上，能源是一个重大议题，会议介绍了 IAEA 与国际能源机构（IEA）、联合国经济与社会事务部（UNDESA）及其他国际和国家组织合作进行的旨在建立能源指标的初步工作。此项工作的目的是建立一套能源可持续发展的核心指标（ISED），包括可持续性的 3 个支柱领域：社会、环境和经济性。作为多机构报告近日完稿的 ISED 手册[2-4]涵盖了反映 CSD-9 会议上做出的决定的事项，并包括认定关键能源问题，如可获得性、能源效率、可再生能源、先进的化石燃料技术、核能技术、乡村能源和运输。

2002 年在约翰内斯堡召开的世界可持续发展峰会（WSSD）上，从可持续发展的角度再次讨论了能源问题。国际社会声明，利用能源的可能性对实现使贫困人口比例到 2015 年减少一半的千年发展目标是很重要的。考虑到发展中国家可持续发展的能源政策的作用，决定帮助和促进发展中国家贫困人口利用能源。预期 ISED 手册将在当前能源趋势和政策评估中有所帮助，并且以便于国家制订政策的格式提供信息。

与可持续性问题有关的一个重要文件是 1997 年通过的联合国《气候变化框架公约》（UNFCCC）即《京都议定书》[2-5]。它要求到 2008—2012 年减少温室气体排放量。综合分析不同的发电链的温室气体排放量表明，核电是产生碳最少的技术之一。因此，建设新的核电厂将能为那些继续选择以核能作为国内能源供应来源的国家达到《京都议定书》的目标做出贡献。尽管《京都议定书》没有否定核能在减少二氧化碳排放量方面带来的好处，但是它还是包括了这样的条款，即实际上把核能排除在了按照三项“灵活性机制”中两项实施的一种选择之外。这三项灵活性机制是：项目联合实施、清洁发展机制和减少排放贸易。它们是 UNFCCC 缔约国为履行其承诺而需采取的除国内行动以外的行动。对核能的限制不适用于排放贸易。核能被排除在灵活性三机制中的两项外，看来是受 UNFCCC 一些成员的这样一种见解的影响：核能是不可持续的，因为其存在一些与安全、核废物处置、核武器扩散有关的问题[2-6]。INPRO 将逐一解决这些关切的问题，以及其他与可持续性相关的问题（经济性、基础结构和环境）。

2.2. 可持续性的诸方面

在广义上，可持续发展的目的是通过整合发展、环境保护和社会福利，实现国内的、国家之间的和各代人之间的公平[2-7]。这样，可持续性可从 4 个相关的

但不相同的角度或方面（即经济、环境、社会和制度）加以考虑。可持续能源发展的主要挑战是以平衡的方式处理这 4 个方面的问题，利用它们的相互作用并在必要时作了切合实际的折衷。

经济包括对强劲和持久的经济增长的要求，例如保持金融稳定和低而稳定的通货膨胀率。可持续能源供应的关键问题是：经济绩效、能源消耗、能源密集度以及能源输配效率和利用效率。

在环境方面需要消除/减少造成自然资源用尽和环境恶化的负面外部因素。以下课题可被认为是环境方面的问题：气候变化，大气污染、水污染、固体放射性废物、能源资源、土地利用和滥伐森林。

社会可持续性强调以下诸方面的重要性：各种人群之间的公平、对重大的人口统计变化的适应性、社会和文化系统的稳定性、民主参与决策等。社会方面内有意义的主要课题是：能源价格的可承受性、可获得性和差异，增加就业机会的能力，公众参与决策、能源安全、扩散威胁和能源系统的安全性。

获得可持续性第四个要考虑的问题或方面是建立制度性基础结构，因为需要有适当的法律和政策工具来鼓励和实施可持续发展。制度方面包括下列课题：国家可持续能源战略、国际能源合作、能源立法和监管框架、能源科学技术，和能源事故准备和响应措施。

2.3. 能源供应在可持续性概念中的作用

能源在每个可持续发展方面即经济、社会、环境和制度方面起重要作用。各种能源服务支持着经济活动，使如食品和住房等基本生活需求得到满足，并且它们通过改善教育和公共卫生为社会发展做出贡献。利用现代能源服务还可以在环境方面受益，例如，通过减少滥伐森林和降低由于使用效率低下的器具和加工处理技术造成的污染。但是，可能存在一些矛盾：增长的能源利用可能增加污染的绝对水平，并且加速资源消耗。可持续发展就是要找到合适的折衷方案。

能源是战略商品，保证它的可用性和连续稳定供应的安全是政府对国家安全和经济增长所肩负的最终责任之一。为世界总体能源安全和全球经济增长作贡献、并完成实现可持续发展的艰巨任务所必需的燃料组合结构，将由国家状况和政策决定。

在参考文献[2-8]的第 2.3 节和第 4.1 节中，讨论了 21 世纪能源供需情景。这些讨论使用了政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 1996 年启动的《排放情景特别报告》（SRES）。在所有 SRES 情景中，2000—2050 年期间全球主要能源利用呈增长趋势，其增长幅度的中值是增长 2.5 倍；电力需求增长幅度的中值是增长 4.7 倍。图 2.1 和图 2.2 表明了在 SRES 情景中主要能源需求和核电容量随时

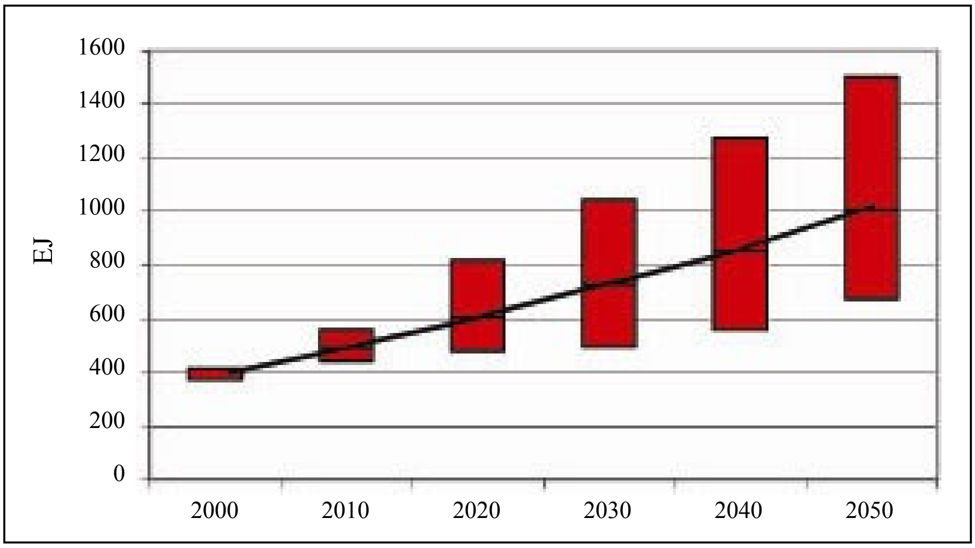


图 2.1. SRES 情景中 2000—2050 年期间一次能源需求的范围，实线代表中值。来源：IPCC，2000 年。

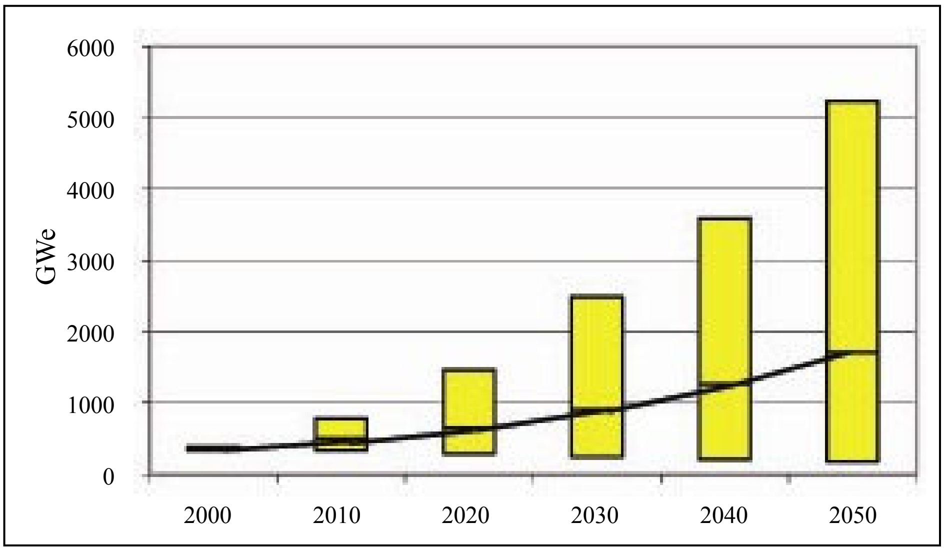


图 2.2. SRES 方案中 2000—2050 年期间核电的范围，实线代表中值。来源：IPCC，2000 年。

间改变的情况。

大多数情景包括核电应用的显著增长。SRES 情景中还预测可再生能源（例如水电、风能、太阳能、生物能）将大幅增加它们在全球能源供应中所占份额。

另一方面，土地使用要求和可用性的不连续等因素可能最终限制一些可再生能源的潜力。

2.4. INPRO 和可持续性的一般概念

正如本报告序论中所述，INRPO 的主要目的之一是：

有助于保证核能能够以可持续方式为满足 21 世纪能源需求做出贡献。

因此，INPRO 与 INS 对可持续发展、特别是对可持续能源供应做出贡献有很大关系，如上文所讨论的那样，可持续能源供应是可持续发展的关键问题。为处理那些与可持续能源发展所需的 INS 发展和推广应用有重要意义的具体问题，INPRO 在可持续性 4 个方面的一般框架内成立了若干任务小组，开发在以下领域评估 INS 的方法：经济性、环境、安全、废物管理、防扩散和基础结构。正如在下一节“评估方法”中详细讨论的那样，INPRO 在 1A 阶段针对每个领域确定了一套基本原则、用户要求和相关准则。通过依次集中考虑这些具体领域，INPRO 成套方法将确保某一既定的 INS 能得到相应的评估：即其详细程度足以使人有把握地确定该 INS 有能力对可持续能源发展做出贡献，从而达到可持续性的总目标。此外，这种评估的结果为确定战略和必要的短期、中期和长期 RD&D 计划提供重要的输入，以支持给定系统或其组成部分的开发和推广应用。

在这方面，INPRO 认为，为达到可持续性诸项目标而进行的 INS 的开发和推广应用将随着时间的推移而产生成果，而 INPRO 的时间框架实际上要延续到 21 世纪末。在国家、地区和全球的基础上，预计的今后能源需求（作为时间的函数）、要满足这种需求的能源资源的估计值及不同能源的实际能力和预计能力，可能都会随时间的变化而变化。因此，需要认识到，评估 INS 的 INPRO 方法不是在一个单独时间点上进行的静态过程，而是一个动态过程，需要随着开发进程、边界条件的变化以及可持续发展要求的变化而更新。这种在国家和地区基础上进行、并结合未来情景（见第 3 章和第 10 章）的动态模拟评估，将确定和促进 INS 不同国家方案间的互补性和协作性，以及更广泛的国际合作。

可持续性的一般概念及其 4 个方面和 INPRO 主题诸领域间的关系示于图 2.3，下面对此进行更详细的讨论。

在本报告中，可持续性的经济性方面主要在第 4 章“经济性”中阐述。INPRO 经济性基本原则要求，核能和相关产品及服务应该以能够支付得起的价格保证供应。为满足这个基本原则，相关的 INPRO 用户要求是：INS 提供的能源要有可以与其他能源竞争的成本；要有开发和推广应用 INS 的资金；可接受的投资风险；要有对 INS 进行调整使其能满足不同市场条件的能力。通过要求分析这些因素，INPRO 成套方法将确保在考虑所有其他 INPRO 主题领域时也对经济性加以考虑，并且蕴含这样的要求，即对为满足在任何 INPRO 领域的 INPRO 要求所需要采取的所有措施进行成本—效益分析。此外，在与其他能源进行成本比较时，

还需要考虑能源安全问题和就业机会（在可持续性整体方面需要处理的问题）。本报告的其他部分明确阐述了一些经济性方面的问题，例如：在第 6 章“环境”中讨论了资源利用和能源供应效率。

可持续能源发展的环境方面在本报告第 6 章“环境”和第 7 章“废物管理”论述。第一个 INPRO 环境基本原则涉及环境效应的可接受性。相应的用户要求规定应激物应该是可以控制的，并且由能源系统产生的应激物对环境的影响（如空气和水的污染）应是有限的。第二个 INPRO 环境基本原则涉及使一个能源系统成为可持续的系统所需要的资源的高效利用和可利用性问题。关于放射性废物的 INPRO 基本原则要求的提出，是考虑到要采用一切措施来保护人类健康和环境、避免给后代留下不应有的负担、尽量减少废物和使废物管理最佳化。

有关社会方面的讨论主要在本报告的第 5 章“核设施安全”和第 8 章“防扩散”中进行。与安全有关的 INPRO 基本原则要求强化应用纵深防御概念、更加强调 INS 中内在的和非能动的安全特性、把来自射线照射的危害限制在与其他可比工业相应风险的可比水平内，并开展与 INS 相关的、足够的 RD&D 工作以确保达到适当的置信水平。在防扩散性方面，INPRO 基本原则要求通过平衡使用 INS 中的内在和外加措施来减少滥用核材料和技术的可能性。

最后，第 9 章“国家、地区和国际的基础结构”主要论述了制度方面，包括公众参与决策的内容，但一些具体问题将在其他章节中阐述，例如：达到防扩散目的所需的制度措施（称为外加措施）将在本报告第 8 章“防扩散”中加以讨论。

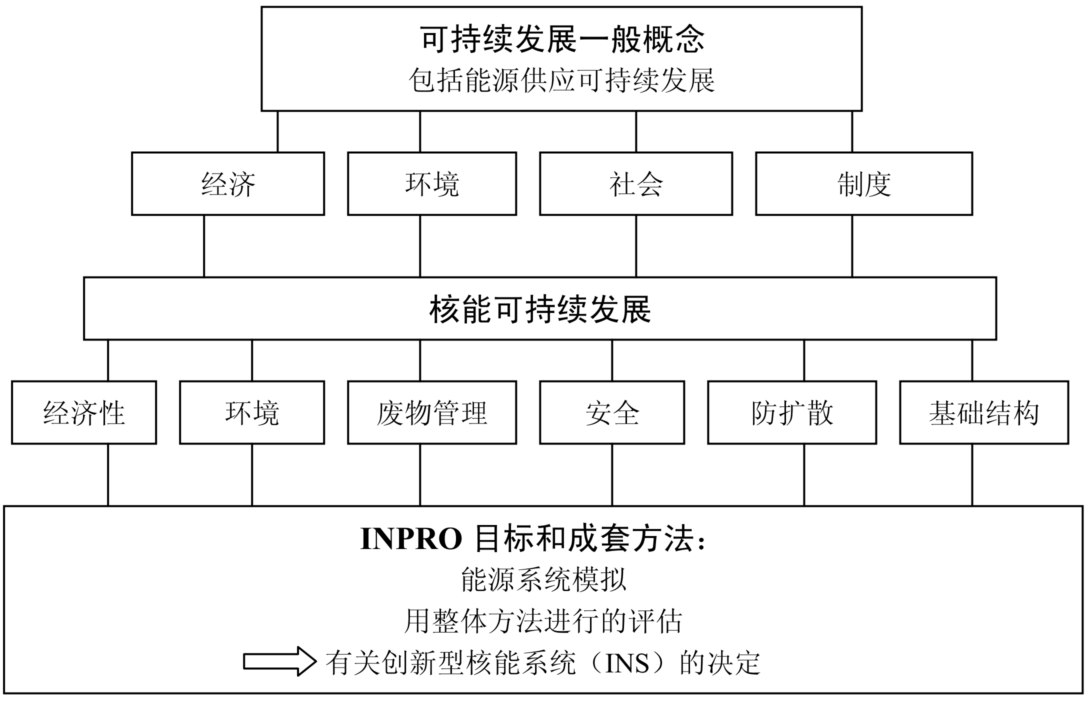


图 2.3. 联合国可持续性概念与 INPRO 的相互关系

2.5. 结语

能源开发是世界可持续发展的基础。INPRO 的总目标是保证核能能够以可持续的方式满足 21 世纪期间能源增长需求。可持续性的一般概念和对可持续能源的具体考虑已被纳入 INPRO 目标并已整合到 INPRO 成套方法中。

核技术在为可持续能源供应做出重大贡献方面具有很大潜力。INPRO 集中精力制订 INS 为世界能源供应做出重大的和可持续的贡献所必须达到的具体要求。当 INPRO 主题领域与其他联合国倡导性文件中阐述的可持续性的四个方面不一一对应时，所选择的结构要保证对上述这些方面的所有相关内容都进行说明。

随着 INPRO 的进展，其活动将继续从 IAEA 有关可持续性的一般活动（例如，ISED）中受益并受其指导。预计，INPRO 的成果将成为 IAEA 在推动可持续能源全球发展方面的重大贡献。

在 INPRO 范围内开发并在下列诸章中阐述的基本原则、用户要求和准则，都用于反映本章中所描述的可持续发展目标。

第 2 章参考文献

[2-1] BRUNDTLAND COMMISSION, World Commission on Environment and Development, “Our Common Future”, Oxford University Press, Oxford (1987).

[2-2] UNITED NATIONS, Conference on Environment and Development, Vol. I, Resolutions Adopted by the Conference (United Nations Publication, Sales No.E.93.I.8), Rio de Janeiro (1992).

[2-3] UNITED NATIONS, World Energy Assessment, “Energy and the Challenge of Sustainability”, (United Nations Publication, Sales No.OO.III.B.5), New York (2000).

[2-4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, (Department of Nuclear Energy, Planning and Economic Studies Section), IAEA, Vienna (to be published in 2004).

[2-5] UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, Kyoto protocol, UNFCCC, New York (1992). http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf.

[2-6] NUCLEAR ENERGY AGENCY, “Nuclear Energy and the Kyoto Protocol”, OECD Publications, Paris (2002).

[2-7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Working papers of INPRO Phase 1B (1st part), Individual Case Study by Mr. Aslanyan, IAEA, Vienna (2003).

[2-8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the evaluation of innovative nuclear reactors and fuel cycles (Report of Phase 1A of INPRO), IAEATECDOC-1362, Vienna (2003).

第 3 章

评估方法

3.1. 引言

在详细阐述有关制订 INS 的国家和国际建议时，需要对方案进行系统的客观评价[3-1]。为满足这种需求，INPRO 评估方法试图为实现下述目的提供工具：

- 对成员国在国家、地区和/或全球的基础上选定的一种（或多种）INS 进行筛选，以评价其是否能满足可持续能源发展的目标；
- 比较不同的 INS 或其组成部分，以便（例如）为找到能满足某一成员国需求的优选或最优的 INS，或者在全球基础上比较它们的能力；
- 确定改进 INS 现有组成部分性能和/或开发新组成部分所需的研究、开发和验证工作（RD&D）。

评估可分为 3 种类型，即筛选评估、比较评估和 RD&D 评估。INPRO 成套方法要求任何既定的 INS 都应接受筛选评估，以便判断它是否是可持续的。根据评估者（即实施评估的人员或实体）的具体兴趣，某一既定的 INS 可接受或不接受比较评估和/或 RD&D 评估。例如，对于正在寻求使用 INS 某一组成部分（例如反应堆或燃料制造设施）的成员国，预计其将会首先进行筛选评估，然后再对多个方案进行比较评估。在筛选评估过程中，有 1 种或多种方案可能被判定为是不可持续的，因此这些方案不会得到进一步考虑。随后进行的比较评估将帮助成员国选择符合其要求和限制条件的优选方案。RD&D 评估将是 INS 组成部分和系统的开发者和支持者/投资者最感兴趣的内容。这一项工作将再次从筛选评估开始，以确保组成部分能满足实现可持续能源供应的要求。如果组成部分不能满足相应要求，那么就可使用筛选评估来确定使组成部分满足相应要求的 RD&D 目标。如果组成部分通过了筛选评估，那么评估者可以继续进行 RD&D 评估以设置 RD&D 目标，或先进行比较评估以确定这项技术相对于其他技术的优势和不足之处，例如评估这项技术开发是否有依据。

INS 评估者可能仅对一套完整 INS 的某一组成部分（例如用于发电或海水淡化的反应堆）或一个完整系统或一套完整 INS 的几个组成部分感兴趣。不管他的兴趣在哪里，评估者必须对系统的所有组成部分（例如用于燃料生产或废物管理的组成部分）进行评价，以便形成对系统的整体看法，并因此确保他感兴趣的

组成部分以及相应的整个系统都是可持续的（见第 2 章“INPRO 与可持续性概念”）。换言之，INPRO 方法应当总是用于完整的核能系统。

应当注意的是，评估者——成员国、或成员国组、或 RD&D 的投资者等某一其他实体、或有兴趣推广应用 INS 的任何其他组织——需要考虑核能的所有利益相关者的利益和观点。INPRO 成套方法是专门为促进这方面工作的开展而建立的。

在进行评估时，评估人员必须考虑一个或几个参考能源情景。例如，如果评估人员的眼光集中在他所在州（省）的能源供应情况，那么他就要考虑他本国的能源情景（或者考虑基于他本国内的某个地区的更加地方化的情景）。该国家情景的预期也会考虑全球的和/或地区的需考虑因素，例如，全球的铀需求量、后处理能力等等，因此也必须采用地区的或全球的情景中的某些要素。如果评估人员对全球的能源供应状况（将它作为可持续发展的一个组成部分）感兴趣，那么为了得出全球的情景，他必须利用将各个地区和国家组考虑在内的涉及范围更广的情景。这种情景将对未来能源需求发展做出最佳估计，而且将取决于预期随时间变化的诸多因素。同样，INS 的开发和推广应用工作也将随着时间不断向前迈进，在此期间，可供使用的能源组合结构也将不断发生改变。此外，随着条件的变化，应当由 INS 来满足的要求可能也会随之变化。因此，必须使用动态（时间相依）模拟方法，定期地尤其是在环境或边界条件发生了大幅变动的时候，重新评价给定 INS 和/或其组成部分在满足国家、地区和全球能源需求方面所发挥的作用。可供使用的模拟工具将包括 IAEA[3-2，3-3，3-4]目前已经开发出来的现有工具以及 INPRO 和其他机构正在开发的工具（见第 10 章“核电发展的模拟”）。

在 INPRO 的第二步（1B 阶段的第一部分），曾对筛选评估所使用的评估方法进行测试和确认，而比较评估所使用的方法仍处于开发过程中，虽已取得良好进展但尚未完成，与此同时，RD&D 评估方法的开发工作仍处于相对的初期阶段。

3.2. 基本特性和术语

INPRO 方法依赖于对 INS 与下述诸项相符合程度的评估：

- 基本原则（BP）；
- 用户要求（UR）；以及
- 准则（CR），每项准则中都含有指标（IN）和可接受限度（AL）。

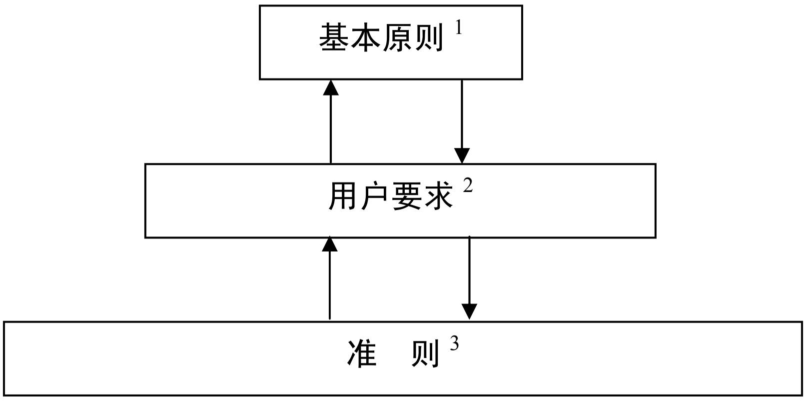
由于与 INPRO 有关的文件（即使是在讨论诸如目的、目标、原则、根本法则、规则等很一般的主题时）经常使用不同的术语，并采用不同的优先次序，因此必须对这些术语及其他重要专有名词给予一个通用的定义。对在本报告中使用的重要术语及它们之间的相互关系说明如下。

核能系统是一个包括核设施以及相关的制度措施在内的完整范畴。核设施包括用于采矿和水冶、铀和/或钍的加工与浓缩、核燃料制造、生产（发电或其他能源相关产品，例如蒸汽、氢、海水淡化）、核燃料后处理（如果采用闭式核燃料循环）、以及用于材料管理活动（包括贮存、运输和废物管理）的设施。在 INPRO 中，可能对所有类型的反应堆（例如使用轻水、重水、气体、液体金属和熔盐等不同冷却剂，不同的热功率和用途，例如发电、工业用热、集中供热、海水淡化、以及锕系元素和裂变产物的分离与嬗变）及相关的燃料循环（例如铀、铀—钚、钍、铀—钚—钍循环）都加以考虑。应将此类设施在寿期中的所有阶段都包括在内，例如选址、设计、建造、设备制造和安装、调试、运行、退役和场区复原/关闭。制度措施包括作为开展和实施核计划所需的国家和国际基础结构组成部分的协议、条约、国家和国际法律框架和公约，例如《不扩散核武器条约》（NPT）、《国际核安全公约》、《IAEA 保障协定》。此类核能系统的一个例子是综合采用了下述设施的系统：气冷热中子反应堆和液体金属冷却快中子反应堆以及采用了钚/铀燃料、后处理设施、集中的燃料生产和废物处理设施的闭式燃料循环。

在 INPRO 中，**创新型核能系统（INS）**包括能够使核能在 21 世纪全球能源供应中做出重大贡献所需的所有系统。在这种前提下，除了创新型设计之外，未来系统还可能包括核装置的渐进型设计。渐进型设计[3-5]是一种通过从小规模到中等规模的改进，来对现有设计进行改善的先进设计。渐进型设计强调保持设计的可证实性，以便将技术风险降至最低。而创新型设计[3-5]则是一种在设计方案或系统配置中采用了与现有实践不同的基本概念的先进设计。这些系统可能不仅包括发电装置，而且还包括将在发达地区、发展中国家以及转型中国家推广的其他装置（不同的规模和能力），并具有产生高温热、集中供热和海水淡化等其他用途。参见参考文献[3-6]—[3-11]。

鉴于电力公司的保守特性以及许多成员国对成熟技术的使用希望，因此是否使用一个已发生根本概念性变化的过程是一个非常重要的课题。本文将在下文有关不确定性的内容以及有关经济性的章节中对这一课题进行简要讨论。

在 INPRO 内部，有关核能系统创新型设计的要求是按照一定的层次建立起来的（见图 3.1）。



注：箭头表示导出（向下）和满足（向上）的方向。

图 3.1. 对核能系统创新型设计要求的 INPRO 层次

在 INPRO 层次结构中，**处于最高层次的是基本原则（BP）**，这是为开发 INS（或设计特性）提供广泛指导的总规则。在 INPRO 的所有领域（经济性、环境、安全、废物管理、基础结构和防扩散）中，必须对全部的基本原则都加以考虑。例如，在 INPRO 的安全领域需要考虑的一条基本原则是 INS 应当将已获改善的纵深防御纳入其基本安全方案，并确保纵深防御中的各个防御层次比在现有装置中更加彼此独立。应当注意，在某些主题领域——主要是安全，在其总目标中甚至会规定一些比基本原则更一般性的导则。这些总目标反映了全世界在该领域所取得的共识，并适用于创新型设计以及现有设计和渐进型设计。

在 INPRO 层次结构中，处于第二层次的是**用户要求（UR）**。用户要求是给定创新型系统获得用户接受必须满足的条件。用户是与核技术的潜在应用前景有利害关系或对其感兴趣的实体。在 INPRO 中，用户包括下列群体：

- 投资者、RD&D 组织、设计者、电力生产者和电力公司的代表；
- 决策者，例如中央政府、立法机关、监管机构、州（省）的地方组织和权力机构、以及包括非政府组织（NGO）在内的上述机构的咨询者和利益相关者；
- 能源的最终用户（公众、企业等）；
- 感兴趣的大众媒体；以及
- 相关国际组织，例如国际原子能机构（IAEA）、经合组织国际能源机构

[1] 与第四代国际论坛（GIF）的术语“目标”相对应。

[2] 与 GIF 的术语“准则”相对应。

[3] 与 GIF 的术语“度量”相对应。

（OECD-IEA）、经合组织核能机构（OECD-NEA）等。

通过制定涵盖上述各种用户在内的用户要求，INPRO 努力确保在 INPRO 评估中考虑了所有利益相关者的利益和观点。预计上文所列（尤其是第一类和第二类）的许多利益相关者或他们的咨询者将实施 INPRO 评估，或者要求向他们提供此类评估的结果。这些团体构成了参与能源规划、供应、以及设施的选址和许可证申请与审批的有关各方。评估工作需要有精通 INPRO 各领域专门知识，并充分了解包括 INS 在内的核设施的人员参与，以使全面评估工作能够顺利进行。应当将此类评估的结果提供给所有的利益相关者，而不是仅提供给核专家。但是，对于提交给非核专家的结果，其格式和措辞必须满足利益相关者的要求，而这目前仍然是个有待解决的问题。

用户要求规定了确保相关基本原则得到实施所需采取的措施。在 INPRO 考虑的主题领域中，可将用户要求分为不同的类型和级别。一些用户要求适用于整个核能系统，另一些则仅适用于特定的组成部分（例如反应堆）或特定的核技术（例如轻水堆）；一些用户要求与系统或组成部分的功能相关，另一些则规定了实施措施或分析方法。例如，核安全领域的一项用户要求是一个功能性要求，例如应当对一切实践目的防止放射性从 INS 装置中发生重大泄漏，从而保证除了出于类似目的为任何工业设施制订的一般应急措施外，INS 装置将无需在场区外采取搬迁或疏散措施。

最后，需要一套（或多套）**准则**（**CR**）来确定给定的用户要求是否得到满足以及满足的程度如何。准则由**指标**（**IN**）和**可接受限度**（**AL**）组成。指标可能基于一个单一参数、一个综合变量、或者一种状态陈述。

INPRO 评估方法中的一项重要内容是对指标进行数学分类。在 INPRO 方法中可将指标分为 3 类：

1. **实数指标**：在一定范围内连续变化的参数的实验验证值或计算值。这种指标反映了被评估的 INS 的性质，并可直接或在加权（如第 3.4 节进一步讨论的一样）后作为评估工作的论据。
   例如，以数字表示的经济、安全和环境参数，这些参数可提供有关系统的大量定量信息。

2. **整数指标**：在物项顺序表上赋予每个组成部分的一个整数。
   例如，在严重事故后保持的安全屏障的数量。

3. **逻辑指标**：仅有 0 和 1 这两个可能值的变量，在评估程序中，该变数可被理解为“是”和“否”(接受或者拒绝)。逻辑指标通常与 INS 的一些必要

特性相关，并仅用于筛选，而不作为度量。

例如，在用户要求中提出的问题“是否定义了安全概念”。

除了对指标进行数学分类以外，在第 3.5 节 RD&D 评估中将讨论另一种指标，即所谓的**关键指标**（KI）。

可接受限度（AL）是定量或者定性目标，可以将其与指标值进行比较，以做出是否接受的判断（通过/失败、好/坏、更好/更坏）。正如本章引言曾提到的，INS 在某一特定情景中的假设边界条件将会随着时间而改变。因此，可以预见，某些可接受限度也会随着时间而改变。

例如，在安全领域的一项准则（与上文中的用户要求的例子有关）可能是：向环境释放大量放射性物质事故的发生频率的计算值应低于 10^{-6}/装置·年，或者在设计中完全排除了发生这种事故的可能。在这种情况下，指标是一个实数值，表示发生大规模释放的可能性，而可接受限度是预期发生频率的给定值 10^{-6}/装置·年。对于上文给出的逻辑指标的例子（问题），可接受限度是回答“是”（如果回答“否”，则意味着 INS 是不可接受的）。

图 3.1 用箭头指明的基本原则、用户要求和准则之间的关系如下：

- INS 准则是否得到满足将通过确认指标是否满足可接受限度来证实；
- 用户要求是否得到满足将通过确认相应的准则是否得到满足来证实（从下至上法）；
- 基本原则是否得到遵守将通过是否满足了相关用户要求来加以判断；
- 拟定要求的合理顺序是，首先确定基本原则，然后导出用户要求，最后再确定相应的准则（从上至下法）。

已在 INS 的下述领域制订了基本原则、用户要求和准则。

- 经济性（第 4 章）；
- 核设施安全（第 5 章）；
- 环境（第 6 章）；
- 废物管理（第 7 章）；
- 防扩散（第 8 章）；
- 国家、地区和国际的基础结构（第 9 章）。

基本原则、用户要求和准则的基础广泛。它们是在考虑国家和地区发展趋势时渴望实现、并且在技术上多半可以实现的理想状态。由于在评估工作中难以对

技术发展进行同步考虑，因此IPRO对目前的发展趋势进行了外推。实际上，在许多方面（例如经济性与基础结构），成员国应更加自由地针对国家或地区[4]或技术规定具体的准则和用户要求。

所有的INS都必须遵守基本原则。用户要求应自始至终以“应当”（希望但非强制）而不是“必须”（强制）的语气陈述。基于下述原因，有的用户要求不必适用于所有的INS：

- INS的范围广泛，其性质也千差万别；
- 核电将是由INS的现有设计、渐进型设计以及创新型设计组成部分构成的组合结构，因此将所有的用户要求和准则用于所有类型的INS，是不切实际的。

在许多情况下，以 INS 指标值与现有设计值的比较结果作为依据来定义可接受限度。术语“现有设计”是指截至2004年的最新设计。此外，有时还根据“现行条例”要求的满足情况来定义可接受限度。术语“现行条例”是指实施评估时已经生效的条例。

ALARP（在考虑经济与社会因素条件下的合理可行尽量低）概念被用于定义在INPRO不同领域内（例如环境、废物管理等）若干指标的可接受限度。这个概念如图3.2所示。

正如图3.2所示，风险（图中以三角形表示）分为3个区：广泛可接受区、可容许区（必须使用ALARP）以及不可接受区。

在INPRO内使用ALARP概念的第一步是必须定义上述3个区的边界值，例如可容许区与不可接受区之间的边界（有时被称为“基本限度”），以及可容许区与广泛接受区之间的边界（有时被称为“基本目标”）。第二步是确定 INS 指标在低于“基本限度”的ALARP区内的值。第三步是进行优化分析，以确定旨在降低特定风险的所有措施都已被考虑在内，优化分析将一直持续到这些措施的代价与相应的收益“在总体上不相称”。如果INS的指标值位于低于“基本目标”的广泛接受区，则没有必要开展实施ALARP概念所需的进一步工作，这一点十分重要。

下文将介绍3种不同类型的INPRO评估。

[4] 在本出版物中，术语地区可能有2个不同的含义。地区可能指一个地理区域，例如一个国家内部的地区或者一定地域范围内由若干国家组成的地区。它还可能指由拥有类似利益和能力的国家组成的集团，尽管这些国家可能位于世界的不同地域。

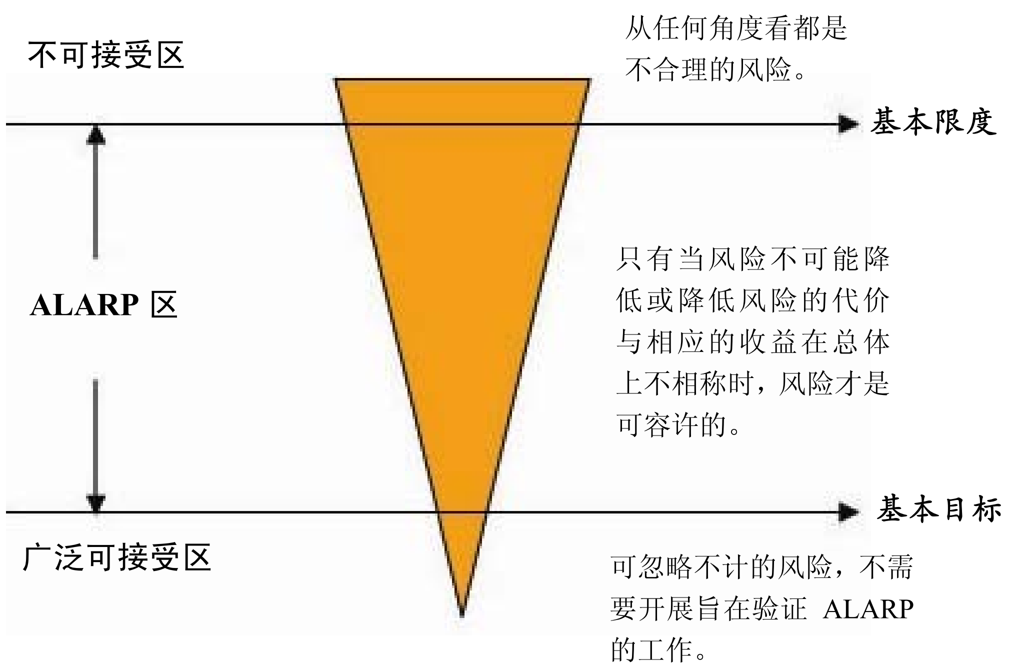


图 3.2. ALARP 的概念图

3.3. 筛选评估

在评估 INS 能力是否满足 INPRO 要求的相应体系需求所需的评审程序中，第一项工作是评价 INPRO 准则（从下至上法）。开展这项工作的一项前提条件是如果准则得到执行，则相应的用户要求以及基本原则也都能得到满足。换句话说，准则对于满足相应的用户要求既是必要的也是充分的，并且对用户要求和基本原则均是如此。

作为实施评估的一个先决条件，INS 装置的指标值及其相应的可接受限度值通常必须由评估者确定。在对 INS 新概念进行评估时，应当将最佳估计值作为给定指标值，因为（非常可能发生的是）指标的实际值只有在对 INS 组成部分进行商业推广应用时才可获得。已经认识到，对新概念而言，此类估计值虽然具有不确定性，但为了避免在筛选评估中因对有前途的新概念产生偏见，从而产生有利于更成熟系统的结果，因此在筛选评估中不对此类不确定性加以考虑。在进行比较评估和 RD&D 评估时确实应当考虑此类不确定性。

预计不确定性在开发过程中将不断降低（见 3.4 节“比较评估”和第 4 章“经济性”）。随着开发工作的进行，需要对指标的最佳估计值进行追踪，以确保它们能继续满足可接受限度要求。如果它们超出了可接受限度，则需要采取纠正行动。还应认识到，在已对系统进行商业推广以及明确了给定的指标值后，设计可能会随之得到改进，并因此导致选定的指标值发生改变（改善）。此类改变通常是为了保持或提高系统或组成部分的竞争能力而进行的。比较评估和 RD&D 评估将

被用于确定期望的改进项目以及设定开发目标。

对于某些可接受限度，INPRO 在本报告中提供了建议值，例如在限度需要获得国际认可和应用的安全领域。（从长远来看，预计将在防扩散、环境、废物管理以及安全领域推荐已取得国际共识的可接受限度。）目前正在编写的 INPRO 手册[3-12]将向评估者提供有关选择指标和可接受限度的更详细信息。

在确定了指标值及其相应的可接受限度值之后，接着进行的一项工作是对 INS 所有组成部分满足特定准则的能力（在 INPRO 中被称为潜力）做出判断。如果指标值是可以接受的，则表明 INS 具有满足特定准则的潜力。否则，则表明“没有潜力”满足特定准则。应当首先针对用户要求的所有准则反复开展这项工作，然后针对基本原则的所有用户要求，接着针对 INPRO 领域（例如安全），最后针对 INPRO 所有领域反复开展这项工作。在评估期间，应当用文件记录每次判断的依据并存档。正如上文所指出的，已经认识到，除了由 INPRO 制订的准则外，预期评估者在评估过程中可能会规定和使用其他准则（或者甚至是用户要求，详见表 3.1），以便能涵盖国家或地区的具体问题或能考虑不断变化的环境和边界条件。随着评估者不断地规定和使用此类准则，预计 INPRO 准则也会根据反馈结果得到不断改进。

表 3.1 介绍了可用于帮助做出有关 INS 是否拥有能够满足 INPRO 准则的潜力（即能力）的判断并进行总结的格式。

表 3.1. 逐步使用 INPRO 评估方法的实例

<table>
<tr><th rowspan="2">基本原则
BP</th><th rowspan="2" colspan="2">用户要求
UR</th><th colspan="4">准则 CR</th><th rowspan="2">INS指标值</th><th rowspan="2">潜力（能力）判断</th><th rowspan="2">判断依据</th></tr>
<tr><th colspan="2">指标
IN</th><th colspan="2">可接受限度
AL</th></tr>
<tr><td rowspan="2">BP1</td><td colspan="2">UR1.1</td><td colspan="2">IN1.1</td><td>AL1.1</td><td>AL1.1
由成员国确定</td><td>X1</td><td>有潜力</td><td>X1<AL1.1</td></tr>
<tr><td colspan="2">UR1.n</td><td>IN1.n</td><td>IN1.n
由成员国确定</td><td>AL1.n</td><td>AL1.n
由成员国确定</td><td>Xn</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">BP2</td><td colspan="2">UR2.1</td><td colspan="2">IN2.1</td><td colspan="2">AL2.1</td><td>X2</td><td>无潜力</td><td>X2>AL2.1</td></tr>
<tr><td colspan="2">UR2.n</td><td colspan="2">IN2.n</td><td colspan="2">AL2.n</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">BPn</td><td colspan="2">URn.1</td><td colspan="2">INn.1</td><td colspan="2">ALn.1</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>URn.n</td><td>URn.n
由成员国确定</td><td colspan="2">INn.n</td><td colspan="2">ALn.n</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

使用 INPRO 方法的最终目的是确认被评估的 INS 能否达到所有的 INPRO 准则，并因此能成为成员国（或成员国组）的可持续系统。只要有一条（关于单个组成部分）INS 准则不能达到，那么整套系统就将被确定为是不可持续的。这种否定的评估结论将会产生如下后果：

- 选择能够满足所有 INPRO 要求的备选 INS（或备选组成部分）；
- 认识到，虽然目前确定 INS（组成部分）从长远来看不是可持续的，但它也许能做出有用的临时性贡献，条件是经过进一步开发，它可以具有可持续性；或者
- 提出必要的 RD&D 任务以弥补 INS（或其组成部分）的不足之处，如果 INS（或其组成部分）在其他方面具有吸引力。这部分工作将在评估方法的第 3 阶段进行进一步讨论。

筛选评估的成果是 2 张清单：一张短清单列出了在可持续性和/或满足成员国（或成员国组）所有需求方面具有潜能的 INS（组成部分），另一张清单列出了需要进行 RD&D 以使其具有可持续性的 INS（组成部分）。

3.4. 比较评估

3.4.1. 引言

INPRO 方法可以对不同的 INS（或其组成部分的不同设计）进行比较，以便（例如）确定一个最优的系统，或者确定竞争的弱势领域和优势领域并据此建立开发目标。此外，一些评估者也许有兴趣将 INS 与备选的能源资源进行比较。如果对不同的 INS、INS 组成部分的不同设计或不同的能源资源进行比较，判断过程必将延伸到判别这些系统的相对潜力（能力）。

通常比较评估仅包括已接受筛选评估并至少在原则上认为具有可持续性的 INS。如果确定 INS 是可持续的，那么评估者也许想对其不同系统/组成部分进行详细比较——所有领域、所有基本原则、所有用户要求、所有准则——或者如果认识到筛选评估已经证实该 INS 可以满足其他领域的预期要求，那么评估者也许希望重点关注一个或多个感兴趣的领域，例如经济竞争力、环境特性。评估者也许甚至主要对一些对他很重要的特定指标（即关键指标）感兴趣。

在比较的过程中，相应的详细程度以及完善程度将取决于评估者所处的环境及其需求，而这些则取决于进行评估的根本理由（即目标）。下文将简要介绍一些可供使用方法的实例。这些实例都假定比较的内容虽然是很全面的，但就像上

文讨论的一样，它们当然也许更有局限性。一般说来，最简单的方法具有最广泛的可利用性。更复杂的方法是那些可以根据 INPRO 成员的需求和利益进行进一步开发的方法。

3.4.2. 判断 INS 的能力

在进行比较评估，而不是仅决定给定指标是否满足可接受限度（就像在筛选评估一样）并据此得出满足准则（有潜力）或不满足准则（没有潜力）的结论时，必然会考虑指标值与可接受限度的吻合程度。实际指标值与可接受限度越吻合，则表明 INS（或其组成部分）满足给定准则（和相关用户要求和基本原则）的“相对潜力”或能力越大。

这种延伸了的判断主要适用于指标和可接受限度都用数值表示的准则。通过对若干 INS（或其组成部分的不同设计）进行此种比较评估的方法，可以获得不同 INS 满足每项准则的相对能力（或潜力）的比较结果。图 3.3 介绍了一种对 2 个 INS 进行此种比较评估的方法。

应当注意，在图 3.3 中，由于 1 号 INS 不能满足 IN-n 指标的可接受限度，因此判断结果为这个 INS 在长远来看是不可持续的。但是，如果 IN-1 和 IN-2 指标对于给定的评估者十分重要，那么此类评估结果也许能成为一项旨在寻找使 IN-n 能符合可接受限度的路线/发展途径的决定。在以后的工作中，这 3 个指标可能成为“关键指标”，并将在开发过程对这 3 个指标进行追踪，以确保在改善 1 号 INS 在 IN-n 指标性能并使其能符合可接受限度的同时，保持或者甚至改善 1 号 INS 在 IN-1 和 IN-2 指标中的相对优势。

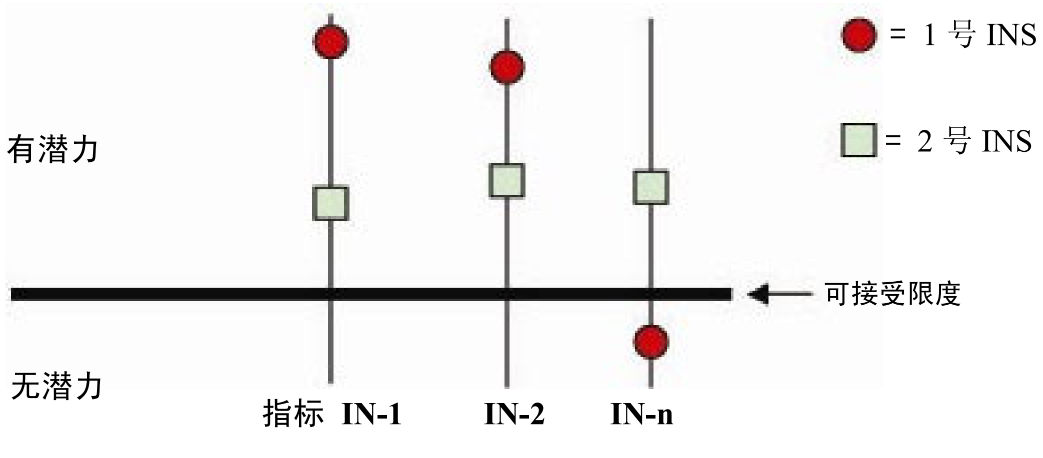


图 3.3. 对 2 个 INS 进行比较评估的实例（纵轴对每个指标有不同的刻度）

3.4.3. 判断 INS 的成熟性

除了评估 INS 满足准则以及随后的用户要求和基本原则的能力外，在进行

比较评估时还应指出评估判断的不确定性。判断不确定性的总体水平（就像表3.2 所确定的一样）与 INS 或其组成部分的成熟水平直接相关。此外，正如第 4.5 节所提到的一样，这种不确定性越大，不能全面实现开发目标且开发成本超出估计成本的风险就越大。

表 3.2. 整套 INS（或其组成部分）的成熟性以及相应判断不确定性的分级

INS（或其组成部分）的开发阶段	INS（或组成部分）的成熟性水平	判断的不确定性水平
没有理论或实验证据证明，任何准则之所以不能被 INS 满足，是由于存在不能在以后的技术发展中克服的物理、技术或其他制约因素。	初步概念	很高
最重要（不是全部）的 INS 组成部分已得到理论验证和实验核实，并且有理论证据证明 INS 可以满足所有的准则。	概念可行性已确定	高
INS 所有组成部分已得到理论验证和必要的实验核实，并能满足准则。	可行性已论证	中
INS 所有组成部分已完成进行筹备招标所需的详细设计。必要的中试装置（小规模）已经建成并正在成功运行。	已开发和验证	低
已建成和运行首座装置	商业证实	较低
建造和运行一系列装置	全面商业推广	最低

表 3.3 详细地指明了将创新从初步概念阶段推进到商业成熟阶段所需付出的努力。应将该表用于确定 INS（或其组成部分）的不确定性，但该表通常不适用于单项准则。不过当在准则的判断结果接近可接受限度时，也许应当考虑相关的不确定性。

表 3.3. 基于若干因素确定 INS（或其组成部分）的成熟水平

成熟水平	因素（达到给定成熟水平的最低要求）			
	研发规模	已实施的核实与试验	可使用的技术文件	监管部门的核准现状
初步概念	理论研究或评价和数值计算已由专业人员或小组完成。	没有或很少。以前发表的有关材料和组成部分特性的数据已在很大程度上得到应用。	在学术期刊发表的文章和在国家和国际会议的报告。	虽然未经正式监管核准，但与监管者的讨论也许已经开始。
概念可行性已确定	与已有实验支持的新特性有关的详细理论和数值分析工作已由国家实验室和技术大学的特别专家组与设计者合作完成。	新的主要技术方案的物理完善性和可行性通过实验室试验得到验证，包括初步（反应堆堆外）耐久性试验。	概念设计已完成，足以用文件记录设计的所有重要创新型元素并针对系统提出设计要求。	实验方案已得到监管者核准；并为此目的商定将在详细设计计算中使用的所有数值代码的确认要求。
可行性已论证	整套设计参数的计算工作已经完成，有关中子、热工水力学和材料科学的全面试验活动正在进行之中。	主要新型设备元件已在全规模试验台架上进行测试，必要时还进行包括长期耐久性试验在内的堆内试验，并可提供初步试验结果。	详细设计已完成，足以指定主要组成部分；组成部分供应商已收到技术规范。	初步试验和测试方案的结果已向监管者提交并被接受。
已开发和验证	辐照样品的堆后检查以及新结构元件试验结果的评价工作已完成。已对中试装置的运行情况进行分析，以便对商业设备的设计进行最终改进。	如果需要，建造中试装置（缩小规模），并运行足够长的时间，以便核实新的基础技术、经济性、安全和环境参数。	详细设计已达到可以筹备商业竞标，并开始制造和建造工作的程度。	许可证申请前的讨论取得良好进展，监管问题得到充分解决，可以允许进行商业招标。
商业证实	有关下一代设计的初步概念工作正在进行之中。	已建成并运行首座商业设施。	吸取了经验教训，编写了文件，作为持续改进的一部分被纳入后续若干装置中的设计改进已得到确认。	FOAK 已获许可证。

INS 通常由若干成熟水平各不相同的组成部分组成。对于不同 INS 的比较工作而言，一张显示了每个组成部分成熟水平的图（例如直方图）可以使评估者对一整套 INS 的成熟水平有直观的了解。

初步概念的成熟水平虽被列入表 3.2 和 3.3，但建议在这种开发的初期阶段不使用 INPRO 方法，除非是为了进行初步筛选以寻找初期阶段所拥有的任何明显的“出彩处”。

3.4.4. 比较评估结果的汇总

方法 1

可以采用各种方式对关于不同 INS 满足 INPRO 要求的相对能力或潜力的最终比较结果进行总结或汇总。一个简单的方法是在一种 INS 优于另一种 INS 的某一给定领域中对部分指标进行比较。比较结果可以采用图 3.4 形式或表格形式进行表示。例如，在图 3.4 中，评估者可以发现在一些安全领域，1 号 INS 的安全指标超过 2 号 INS 60%，与此同时，在另一些安全领域，2 号 INS 的指标超过 1 号 INS 40%。此类比较可以有效地在给定领域对一切指标进行等量加权。

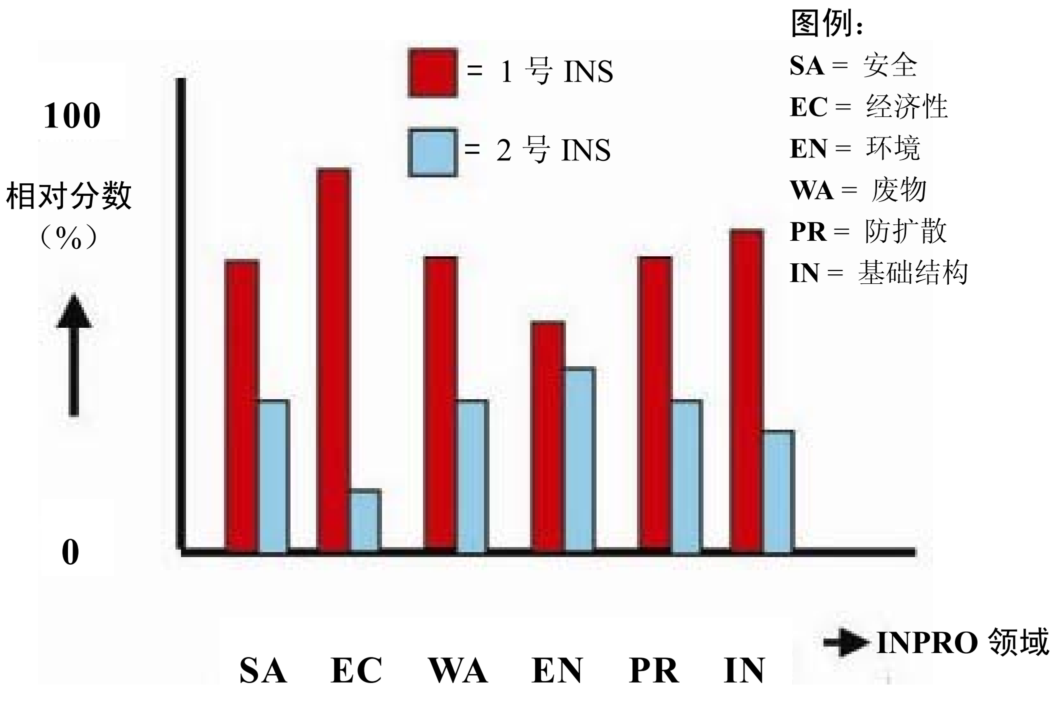


图 3.4. 2 个 INS 能力的比较结果

在图 3.4 所示实例中，1 号 INS 在所有领域内都优于（有更大的能力或潜力）2 号 INS，因此 1 号在整体上明显优于 2 号。实际上，可以预期这 2 个 INS 在每个 INPRO 领域的得分在很多情况下是十分接近的。在这种情况下，必然会对 INS 的单个特性进行更详细的评价。虽然图 3.4 所示的汇总判断不能反映图 3.3 所示的详细情况，但是此类汇总也许有助于为决策者提供总体信息。

如果没有有关对 2 个 INS 能力所作判断的不确定性的信息，那么这 2 个 INS 的比较将是不完整的。此类信息也可以用像图 3.5 一样的直方图表示。

上文介绍的实例表明与 2 号 INS 相比，1 号 INS 的成熟性较低（图 3.5），因此相应判断的不确定性较高，但 1 号通常具有较强的能力（图 3.4）。

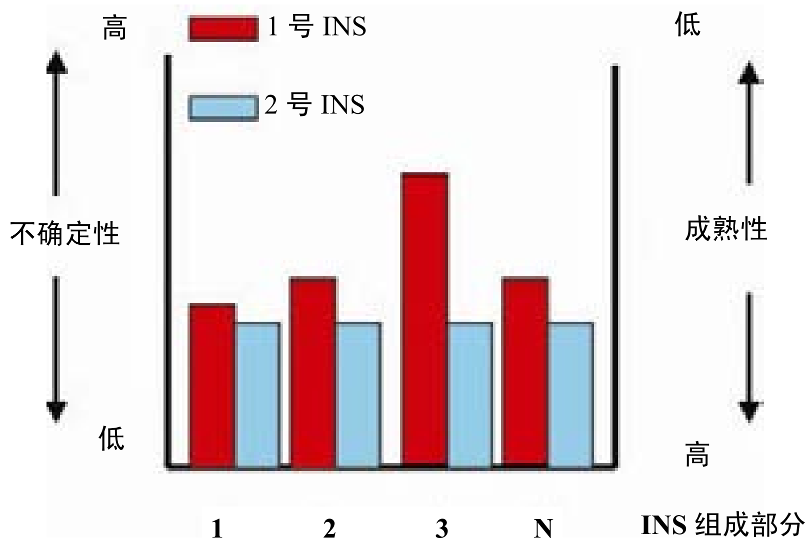


图 3.5. 比较 2 个 INS 组成部分[5]的成熟性图

比较 INS 和汇总各种判断的其他方法

通过确定 INS 满足准则能力的相对潜力的不同范围，能够对判断过程进行改进。这么做还能提高评估方法对结果进行汇总的能力。对接近于可接受限度值的区域，这一范围可被命名为“中等潜力”（MP），下一个（更好）区域可被命名为“高潜力”（HP），接着的下一个区域可命名为“极高潜力”（VHP）。当然，这么做至少需要大致确定每种潜力（能力）范围的边界。图 3.6 介绍了一个可能的经济指标——隔夜造价的能力或潜力的不同水平，并假定可接受限度是 1800 美元/kW 装机。

图 3.6 的实例表明，如果 INS 的造价指标值是 1300 美元/kW 装机，那么就可判断其具有能满足相应准则的高潜力（HP）。采用在评估工作中使用的每项指标和可接受限度以及有关潜力的不同范围，评估工作可以根据指标值与相应的指标

[5] INS 的组成部分是指核装置，例如浓缩设施、反应堆、后处理设施等。

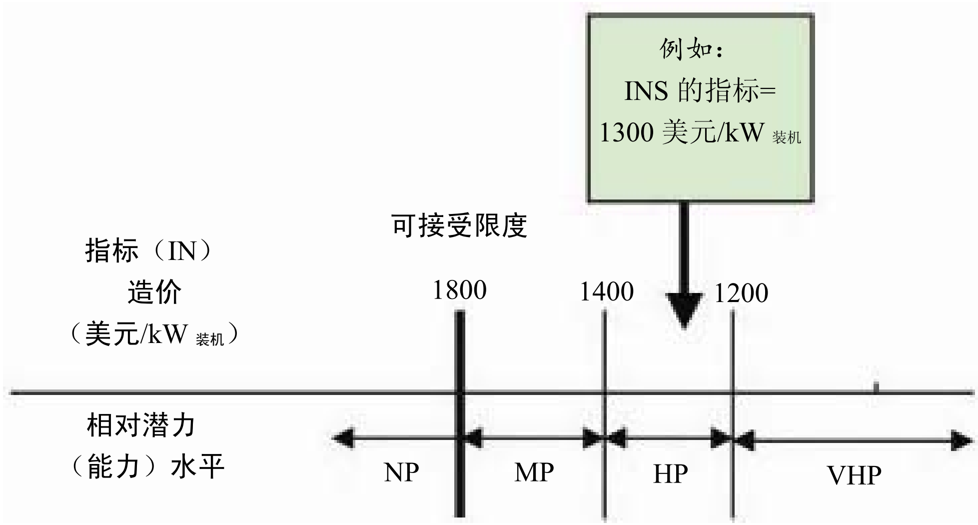


图 3.6. 对已定义的能力或潜力的不同水平进行判断的程序图

范围之间的关系，判断每项准则的不同潜力水平。目前可以采用下述方法对准则的单个判断进行汇总。

一种简单的汇总方法是仅仅累加对每个用户要求、基本原则、INPRO 领域以及最后对 INS（或其组成部分的不同设计）所作的判断（“中等潜力”、“高潜力”等）的相对数[6]（百分数）。图 3.7 介绍了对 2 个不同 INS 进行此类累加的结果。

在图 3.7 中，1 号 INS 明显优于 2 号，因为 1 号出现较高相对潜力的频率更高。

一种较为复杂的方法是通过对单个判断计分（例如非线性计分）的方式对单项准则的判断给予一个分数。计分可以采用 2 种方式：离散计分方式，例如“中等潜力”为 10 分，“高潜力”为 20 分，“极高潜力”为 40；或者可以采用计分函数。图 3.8 对指标“比投资”采用了这种方法。

评估者接着就可以对每项准则、用户要求、基本原则和 INPRO 领域所作的判断得分进行累加，从而得到一个对于每项以及 INS 本身（或其组成部分的不同设计）的总分。采用这种经改进的汇总程序对判断进行汇总的结果可见下文。

图 3.9 所示实例再次表明 1 号 INS 优于 2 号，但是对不同判断水平给予非线性计分的方法目前已增大了这 2 个系统间的实际差别。可以使用相对分数而不是累计分的绝对值。

在 INPRO 的这个阶段（1B 阶段，第一部分），国际上仍未就不同准则的各

[6] 这个相对数被理解为某一潜力水平的实际判断数除以要做的判断的总数。

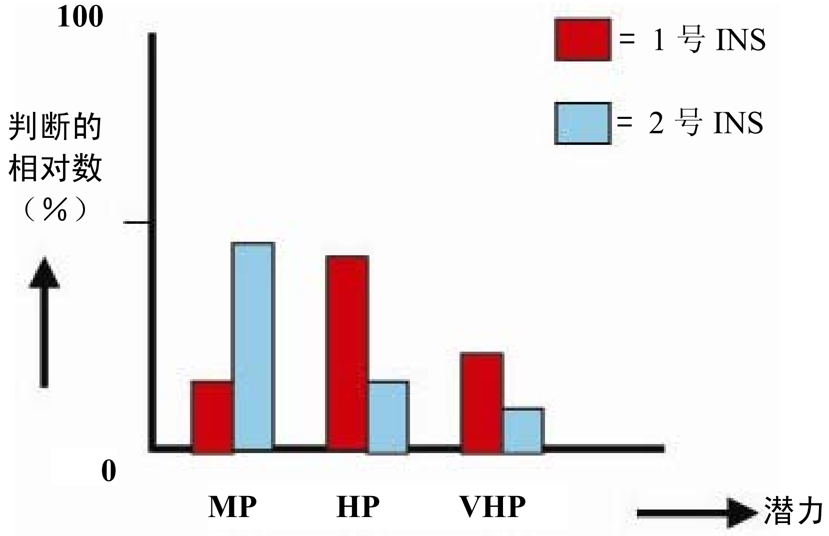


图 3.7. 对用户要求、基本原则、INPRO 领域或 INS 所作判断的累加

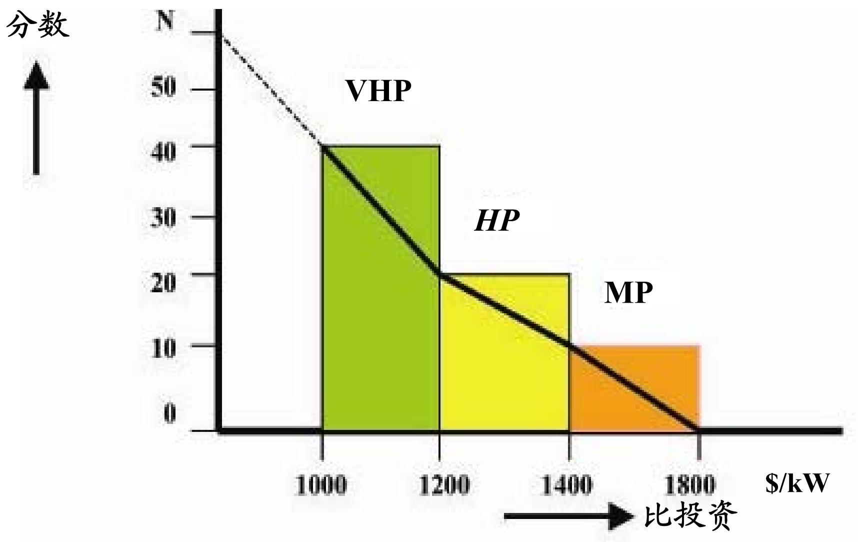


图 3.8. 在判断过程中引入潜力范围和分数的实例

种范围的边界条件或使用的计分方式达成共识。INPRO 手册[3-12]将介绍有关选定的准则和计分函数的实例。但是，就像准则本身一样，预期评估者（如果他们愿意）将对潜力的不同区域指定范围，并分配分数。

在汇总结果时，可能对不同领域或不同基本原则或不同用户要求或者甚至不同准则给予不同的加权。正如上文所讨论的，一旦决定某一给定的 INS 已经过筛选并能满足准则、用户要求和基本原则，评估者便可以通过重点关注 1 个或 2 个感兴趣的关键领域来有效地进行加权。在这种情况下，预计对准则或用户要求使用计分函数和加权将更加有效。

在汇总结果时，应强调的一点是，在评估单项准则时所获得的详细信息对于

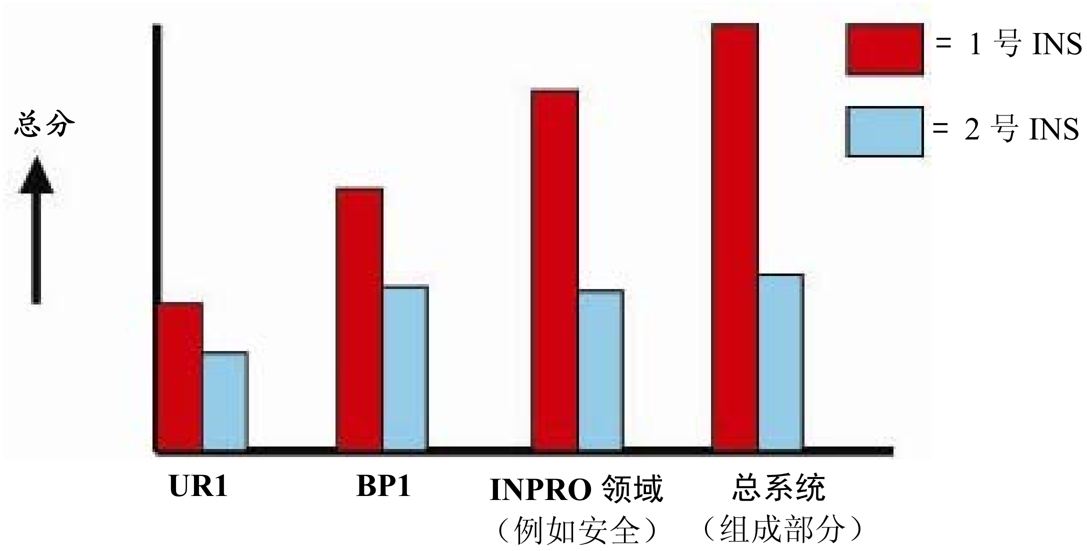


图 3.9. 使用计分方法对判断进行汇总

确定开发目标和计划具有最大的价值。但是，此类评估汇总方法是一项为决策者提供总体信息的潜在可利用技术。

3.5. RD&D 评估

INPRO 评估可用于确定具体指标通过 RD&D 应当达到的目标值。本节内容将讨论该概念的基本特性。

3.5.1. 关键指标和期望目标值

正如上文所提到的（见第 3.2 节，基本特征和术语），在确定对 RD&D 的需求和可从其中获得的潜在利益时，也许会根据成员国的偏好为特定或所有的 INPRO 领域确定一份选定的指标（即所谓的关键指标（KI））清单。确定关键指标的指导思想是，关键指标在抓住给定用户要求、基本原则或 INPRO 领域的本质方面具有突出的能力；关键指标还可为制订在特定领域内通过 RD&D 实现的目标以及追踪 RD&D 计划执行过程提供工具。可以通过各种方式来确定关键指标，例如通过为筛选评估和比较评估选择特定指标或用户要求，或者对一些现有指标进行分组，或者有时甚至可以规定一个新指标。对于某一给定 INS，选择关键指标时应参考相关/显著的设计特性、技术和/或制度方法以及边界条件，例如其他可供选择的能量供应源、工业能力等。

此外，还应为给定的关键指标确定一个期望目标值（DTV）。选定的期望目标值应当是通过 RD&D 能够实际达到的关键指标的最终值。期望目标值可以由成员国或技术开发者选择，但选定的期望目标值应能及时地反映国际共识。期望

目标值不能超过物理定律所限定的最终值。但是已经认识到，在某一时刻可以根据在相关时间框架（对于 INPRO 是 50—100 年）内能够实现的目标为期望目标值选定一个较保守的值。因此，期望目标值是关键指标在一段时间内通过适当的 RD&D 判定能够最终实现的弹性目标。

建议期望目标值和关键指标应具有下列一般特性或属性：

- 与目前正在运行的这一代核设施可以达到的最佳性能相比，期望目标值的实现应能大幅提高 INS 在一个或多个 INPRO 主题领域（经济性、安全等）内的性能；
- 期望目标值的实现应具有明显的可行性；
- 关键指标在区分 2 个或更多 INS 概念方面应具有良好的能力；
- 每个关键指标都应当非常独特，并且与任何其他关键指标不应有任何重叠；
- 关键指标可以从现有的 INPRO 指标中选择，并具有良好的识别能力。

在实施 RD&D 过程中，评估者应当对关键指标值进行追踪，以设法缩小当前值与期望目标值之间的差距。除了追踪关键指标外，开发者还需要使用整套准则、用户要求和基本原则进行定期筛选评估，以确保相关的组成部分或 INS 接受了全面评估，并且是可持续的。

3.5.2. 相对利益指数和相对风险指数

可以将期望目标值概念与在介绍比较评估内容的第 3.4.4 节中引入的相对潜力概念联系在一起。在第 3.4.4 节中，引入了对给定指标设定不同潜力值的概念，介绍了给指标分配不同值（例如中等潜力、高潜力和极高潜力）的概念，并讨论了对给定的潜力值分配分值或使用计分函数的概念。在考虑关键指标和期望目标值时，评估者可以通过确定所谓的相对利益指数（RBI）对这一概念进行扩展。根据定义，关键指标期望目标值的 RBI 将为 100，关键指标可接受限度的 RBI 将为 0，并确定一个函数来确定在期望目标值和可接受限度之间的关键目标值的 RBI。“相对潜力”（RP）与指标可接受限度（AL）及“相对利益指数”（RBI）之间的关系见表 3.4。

RBI 将用于追踪从 RD&D 获得的改进。如果 RBI 值接近 0，则表明没有获得什么进展；如果该值接近 100，则表明已取得非常大的进展。

在决定是否实施拟议的 RD&D 计划时，不仅需要考虑要实现的收益，还需

要考虑风险。因此还应对每个关键指标确定一个相对风险指数（RRI）。风险不仅可以包括某一具体 INS 可实现的关键指标的期望目标值中的不确定性，还将反映未来需要投入的开发强度以及概念的成熟水平。因此，如果某一概念的关键指标值得到大幅提高的可能性较大，那么该概念也许能得到发展，但该概念同时可能需要开发某些仍处于开发初期的专门技术特性，并需要在资金和人力等方面进行大幅投入。应该适当选择 RRI。

表 3.4. 相对潜力与相对利益指数的对应关系

<table>
<tr><th>指标（IN）的相对潜力
（RP）</th><th>相对利益指数
（RBI）</th><th>备　注</th></tr>
<tr><td>IN＜AL，
无潜力（NP）</td><td>RBI＜0</td><td>当关键指标值等于指标的可接受限度时，关键指标的 RBI 为 0</td></tr>
<tr><td>IN≈AL，
中等潜力（MP）</td><td rowspan="3">0＜RBI＜100</td><td rowspan="3">为 RBI 定义适当的函数（例如线性或非线性函数等）</td></tr>
<tr><td>IN＞AL，
高潜力（HP）</td></tr>
<tr><td>IN＞＞AL
极高潜力（VHP）</td></tr>
<tr><td>IN=DTV</td><td>RBI=100</td><td>关键指标期望目标值的 RBI 为 100。</td></tr>
</table>

为了汇总对不同关键指标取得的 RBI 和 RRI，评估者可以对每个关键指标都设定不同的加权因子。从理论上说，每个关键指标的加权因子应当与该指标值的变化（使用敏感性分析）对相应竞争力变化的影响（例如通过 INS 的推广速度的变化）相对应。这需要使用比目前更严格的计算模型和工具。

未来，INPRO 活动可能包括开发模型和计算工具，以确定每个指标的加权因子以及获得 INS 的总 RBI 的相关方法。还可能开发一种用于对每个指标值的相关不确定性进行汇总以确定 RRI 的类似方法。一种用于确定 RRI 的方法将以为获得给定利益而需要投入的 RD&D 成本为基础。

为了指导 RRI 的进一步开发工作，评估者也许能考虑使用如图 3.10 所示的二维图解法来比较 RBI 和 RRI。图 3.10 显示了一个 3 种 INS 的理论 RD&D 评估结果实例。

正如图 3.10 所示，坐标原点（0，0）代表已经非常成熟并经过商业验证的技术，这些技术能够为当前这代核能系统提供最好的可实现性能。RRI 为 100 则

表明相应 INS 概念的若干个关键设计特征或该概念所考虑的制度措施的成熟水平仍然很低。RBI 为 100 则反映了合理假设的未来 INS 的期望目标性能。一条直线将风险-利益划分为 2 个区：在下部区域，利益（以 RBI 度量）超过风险（以 RRI 度量）；在上部区域，风险超过利益。因此，将不太可能会考虑开发位于上部区域的概念（例如 3 号 INS），将会考虑开发位于下部区域的概念（例如 1 号和 2 号 INS）。位置接近坐标原点的概念（例如 1 号 INS）将是 INS 的一种渐进型设计。1 号 INS 能满足可持续性的准则，具有低风险，如果得到进一步开发，能在相对较短的时间框架内投入使用。2 号 INS 概念可能优于 1 号，也就是说，当 2 号得到进一步开发后，预计它将优于 1 号，因此 2 号是 RD&D 投入的备选者。

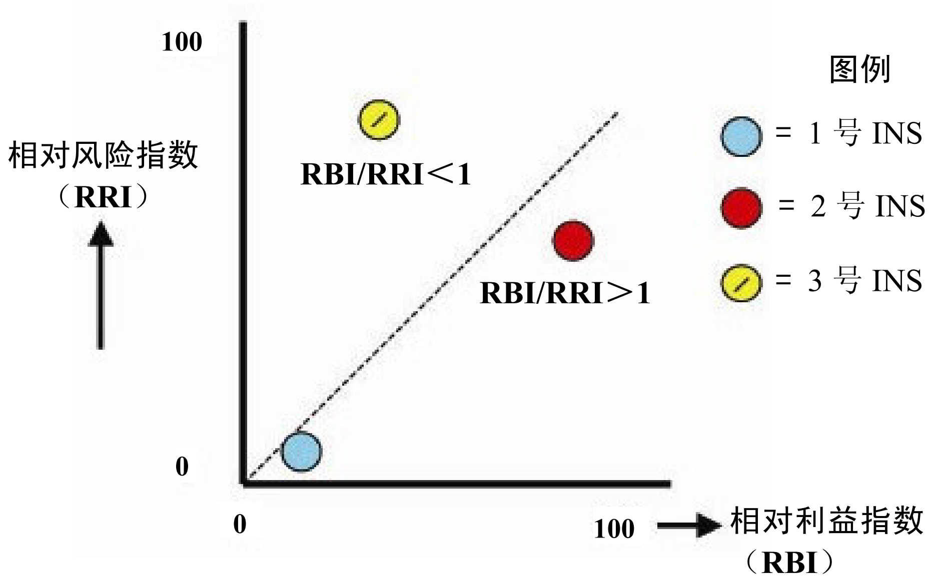


图 3.10. 相对利益指数与相对风险指数的概念介绍

一种较为复杂的方法是从 3 个方面——相对利益、基于技术成熟性的相对风险以及 RD&D 的估计成本——加以比较判断。必须强调的一点是，在 1B 阶段（第一部分），RD&D 评估方法仅是在包括从 2005 年年初开始的 1B 阶段（第二部分）在内的 INPRO 后续步骤中需要进一步开发的方法的草案。该方法的实施程度将取决于来自 INPRO 成套方法用户的反馈。

3.6. 使用 INPRO 评估方法的一般规则

在对成员国开展评估工作的过程中，应当注意若干可接受限度十分灵活，可以允许成员国根据其需求和优先事项来决定可接受的数值，这一点十分重要。但是，应该认识到，有关安全、防扩散、废物管理和环境方面的用户要求和准则可被认为是全球性的。在认识到这点并开展评估工作时，除非另有说明，本报告中

所使用的术语——用户要求和准则是指成员国为满足其需求的充分和必要条件而接受的用户要求和准则。

在评估某一 INS 中进行个案研究[3-13]所获得的经验已经表明，为了适应成员国的具体环境，需要对准则进行修改甚至是引进新准则。正如上文所描述的，根据国家或地区的边界条件（例如优先顺序、限制条件）来增加（见[3-14]）或修改准则是 INPRO 方法的一个特别选择。在这种情况下，应当考虑下述因素：

- 准则应尽可能适用于所有种类的 INS，而不是针对专门的设计；
- 准则的内容应当明确（不能含糊不清）；
- 准则不应含有预先判断；
- 只要可能，指标就应当是可度量和可量化的；
- 指标在逻辑上应当具有独立性；
- 应当以下述方式建立准则：只要能满足所有的准则，就能确保用户相信所有的用户要求都已得到满足。

有关此类国家或地区具体准则的实例（以及尤其是其可接受限度）见第 4 章“经济性”中的经济准则。

在对现有核能系统与创新型系统（其中采用了与现有设计有根本差别的设计）进行任何比较时，系统的成熟性——现有技术在这方面具有优势——应当不会对未来技术在满足 INPRO 基本原则、用户要求和准则的能力/潜力方面的评估判断产生负面效应。正确制订和使用 INPRO 评估方法应被视为开发工作的动力，而不是对至今尚未证实其价值的技术进行（不公正）筛选的工具或识别的机制。说到这里，还需要认识到，某一技术创新的成熟性是决定何时以及是否将这项革新投入商业应用的重要影响因素（见第 4 章“经济性”）。因此，INPRO 评估方法有助于选择对哪项技术进行 RD&D 投入以使其成熟性提高到进行商业应用的水平。

与现有设计有根本差别的创新型设施可能缺乏广泛的经验基础。因此，专家意见在形成对此类设施的判断过程中将发挥很大的作用。在这种情况下，应介绍参与形成专家意见的专家的资质和经验以及形成意见所采用的任何特定的技术/程序，例如 Delphi。

对于未来的全球核能系统，预计可能需要许多不同的 INS（包括核技术概念和制度措施）来满足不同成员国和地区的不同喜好。

从理论上说，希望有一套公共（国际一致同意）准则可用于确认所有 INS 的必要能力。尽管某些 INS 可能需要不同的准则。

在核反应堆领域，与快中子堆（FR）和高温气冷堆（HTGR）相比，压水堆（PWR）、沸水堆（BWR）、重水堆（HWR）和先进气冷堆（AGR）的技术准则和规范都是以更深入的研究为基础。后一组反应堆的需求和准则非常完善，足以满足对现有核电反应堆进行比较的要求。但是，在处理渐进型和创新型设计时，它们仅能作为一个以 INPRO 基本原则、用户要求和准则为起点制订新标准的实例。

随着 INPRO 方法的应用，基本原则、用户要求和准则将接受定期审查，而且几乎肯定将根据经验进行修改。

3.7. 结语

使用 INPRO 方法对 INS 进行评估 INS 所需的基本术语和技术在 INPRO 的 1A 阶段都已制订完成，并在 1B 阶段通过若干个案研究进行了测试。

开发广泛应用所需的方法并确保结果的一致性和可信性还需要付出巨大的努力。

第 3 章参考文献

[3-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Enhanced Electricity System Analysis for Decision Making - A Reference Book, DECADES project document No. 4, IAEA, Vienna (2000).

[3-2] MESSNER,S. and STRUBERGER, M., User’s guide for MESSAGE III, WP-95-69, International Institute for Applied System Analysis (IASA), Laxenburg, Austria (1995).

[3-3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Wien Automatic System Planning Package (WASP), A computer code for power generating system expansion planning, User Manual, Computer Manual Series No.16, IAEA, Vienna (2001). 51

[3-4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Model for Analysis of the Energy Demand (MAED), User’s Manual for Version MAED-1, IAEA-TECDOC-386, Vienna (1986).

[3-5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Terms for Describing New, Advanced Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-936, Vienna (1997).

[3-6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design Concepts of Nuclear Desalination Plants, IAEA-TECDOC-1326, Vienna (2002).

[3-7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Heavy Water Reactors, Status and Projected Development, Technical Reports Series No. 407, IAEA, Vienna (2002).

[3-8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, OECD NUCLEAR ENERGY

AGENCY, WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects, Proceedings of an International Seminar held in Cairo on 27-31 May 2001, C&S Papers Series No. 14/P, IAEA, Vienna (2002).

[3-9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Related Design and Economic Aspects of HTGRs, IAEA-TECDOC-1210, Vienna (2001).

[3-10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Liquid Metal Cooled Fast Reactor Technology, IAEA-TECDOC-1083, Vienna (1999).

[3-11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Advanced Light Water Cooled Reactor Designs-2004, IAEA-TECDOC-1391, Vienna (2004).

[3-12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO manual IAEATECDOC (under preparation), Vienna (to be published 2005).

[3-13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, National and individual case studies, IAEA working papers for INPRO Phase 1B (1st part), IAEA, Vienna (2004).

[3-14] BERBEY, P., European Utility Requirements: Actions in Progress and next steps, International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP 03, May 4-7 2003, Cordoba, Spain.

第 4 章

经济性

4.1. 引言

正如第 2 章“INPRO 与可持续性概念”所述，能源在可持续发展的每个方面——经济、社会和环境——都起着重要的作用，因而保证其可利用性是政府对国家安全和经济增长所肩负最终责任的一个重要方面。能源不仅必须是可利用的，而且必须是消费者买得起的，正如第 2 章“INPRO 与可持续性概念”所简单讨论的那样。这些考虑导致下列基本原则。

4.2. 经济性基本原则

经济性基本原则 1（BP1）:INS 提供的能源及其相关产品和服务必须是消费者买得起的并且是可利用的。

保证核能和相关服务是消费者买得起的最佳途径是，给消费者的价格与低成本/价格的其他能源相比具有竞争性。如果要使能源和相关产品及服务是可利用的，则需要开发和推广应用能源及其相关产品的供应系统。开发和推广应用创新型能源系统需要投资，而且必须使投资人（不论是企业还是政府）相信他们的投资选择是正确的。投资的备选方案有可能是正在寻找投资以进行开发或推广应用的其他能源及技术或属于非能源技术领域。因此，为了推进开发和推广应用，INS 必须在投资相关的竞争中胜出。

如下面（第 4.5 节）中讨论的那样，在不同的市场和地区，在开发和推广应用周期的不同时间和阶段，投资者可能是不同的；对于确定投资的吸引力而言，不同的因素可能具有不同的重要性。然而，在任何情况下，必须让投资者看到一个良好的经营实例。

考虑到核技术的性质，人们认识到，政府的政策和行动（在一些成员国，政府可能参与投资）必将对投资者的决策有重大导向和影响，既可影响其决定是否在开发时投资，还可影响其在技术推广/选购时的投资决定。对于私人部门而言，投资在经营实例中的利润率和回报率是关键因素。因此，如果给消费者的价格具有竞争力，同时投资者也能得到具有吸引力的回报，则其生产成本与其他备选方案相比一定具有竞争力。

4.3. 与经济性基本原则 1（BP1）相关的经济性用户要求和准则

满足这项基本原则所需的相关用户要求和准则阐述于表 4.1。

表 4.1. 与经济性基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

经济性基本原则 1（BP1）：创新型核能系统提供的能源及其相关产品和服务应是消费者买得起的和可利用的。		
用户要求	准则	
	指标	可接受限度
UR1.1 考虑了所有相关成本和抵免，INS 的能量成本 C_N 与在相同的时间框架和地理区域内可供使用的备选能源的成本（C_A）相比应具有竞争力。	1.1.1 核能成本，C_N。 1.1.2 替代能源的成本，C_A。	对 1.1.1 和 1.1.2 项而言： $C_N < k^*C_A$
UR1.2 设计、建造和调试 INS 的总投资（包括建造期间的利息）应当是这样的：可以筹集到必要的投资资金。	1.2.1 财务优良指数。 1.2.2 总投资。	1.2.1 优良指数与规模相当的其他竞争性能源技术相当或更好。 1.2.2 需要的总投资应与在给定市场条件下筹集资金的能力相一致。
UR1.3 考虑到其他能源项目的投资风险，INS 的投资风险对投资者应是可以接受的。	1.3.1 许可证申请状况。 1.3.2 项目建造和调试时间。 1.3.3 政治环境的相关指标显示长期支持核电。	1.3.1 在原产国可能作预先许可证申请。 1.3.2 经过分析的时间表表明拟定的时间进程是现实的。各项时间可与其他竞争性能源供应的各项时间相比。 1.3.3 是。
UR1.4 INS 应适合于满足不同市场要求。	1.4.1 INS 的灵活性。	1.4.1 有能力证明适应不同假设环境的设计灵活性。

下面更详细地论述表 4.1 中讨论的用户要求。

经济性用户要求 UR1.1：考虑了所有相关成本和抵免，INS 的能量成本 C_N 与在相同的时间框架和地理区域内可供使用的备选能源的成本（C_A）相比必须具有竞争力。

第一项用户要求与成本竞争性有关，正如引言中所论述的那样，这是对 INS 既要可用，又要使消费者买得起的一项要求。在确定 INS 和与之竞争的替代系统提供的能源（或其他产品）的最终成本时，必须把一切相关的成本包括进去。根据当时所适用的法律，一种能源可能负担多方面的成本（例如废物管理费用），而另一种能源却不然。在一些成员国中，没有计算进去的核电外部成本[7]很少，因为法律要求生产者为废物管理（包括处置和退役）成本做准备，而与核能竞争的其他能源没有被计算进去的外部成本可能很大。理想的是，当把 INS 和与之相竞争的其他能源作比较时，应将一切外部成本都考虑在内，并在可能的情况下，对外部成本进行内部化处理。

正如第 3 章“评估方法”中讨论的那样，成员国可以很好地对每个用户要求制订他们自己的具体准则。其中有一个准则是基于 C_N 和 C_A 的比较，其可接受限度 $C_N/C_A < k$ 中的 k 在某一特定国家或地区可能小于 1 或大于 1，这取决于核成本是否被相对于其他能源的抵免所抵消，反之亦然。因此，成员国和投资者将根据他们的具体情况确定 k 值。即使有部分因素难以确定其成本（例如外部成本），也可以很好地做出相关决策。为此，对某一中意的选择可以将相关论点妥善措词如下：“选项 N 虽然比选项 A 成本稍高，但是与选项 A 相比，选项 N 下列的优势超过了其成本高的缺点，因此选项 N 是优先的。”但是，如果能源产品要能获利，除成本要有竞争力外，成本还必须低于给定市场上的销售价格，以便为投资者提供利润回报。

在某一给定的国家/地区，决策选择能源供应时可考虑很多因素。这些因素包括，例如：在整体市场及特定的生产者/供应者的市场内，考虑能源供应安全，能量成本的长期稳定性，能源供应技术（即能源结构）的多样性，企业发展的愿望和核技术在企业发展中的作用，对环境效应的判断（正面的或负面的），避免排放，安全性，可持续性，废物管理，国内资源利用（如矿产和劳动力资源及工业能力），公众和政治的可接受性（还可参见第 9 章“国家、地区和国际的基础

[7] 根据定义，外部成本是能源生产者和消费者不计算的，加给社会和环境的成本。

结构”）等。对这些因素的考虑，可能导致决策者和投资者，特别是政府部门接受与另一种其他能源相比成本稍高一些的一种能源。参考文献[4-1，4-2]讨论了确保日本能源供应安全的可靠途径。随着情况的变化，适用于某一特定国家/地区的 k 值也会随之而变化。从长远观点来看，市场力量有望将 k 值限制在接近于 1。

应使用考虑到 INS 和其他竞争性能源技术两者间所有相关成本的决定因素的平准化贴现成本（LDC）模型（参见参考文献[4-3]）来计算 C_N 和 C_A。在进行这种成本比较时，应采用灵敏度分析来评估运行和维护费用及燃料费用等的可能变化所带来的影响。而且，成本比较应使用能源规划工具（参见参考文献[4-4，4-5]），根据与相关地区/市场和 INS 推广应用时间框架相应的成本来进行，以达到对成本各种组成部分的最佳定量估计。

成本应依据后续装置或同样设计的第 N 个装置（NOAK）的成本，而不是这种设计的首台装置（FOAK）相应的成本。模型应是透明的和完整的。成本决定因素包括下列内容：隔夜造价的比投资、包括建设期利息（IDC）在内的筹资费用、运行和维护费用、管理费用、燃料费用、在装置预计寿期期间进行定期升级改造的费用（例如仪表测量与控制系统的更换或蒸汽发生器的整修）、资本贴现率、业主费用和特别是土地使用费、预计的容量因子（这种因子尤其考虑了可利用因子和负荷因子）、保险费、电厂寿命、电力净产出（考虑了热效率）、预期建设/项目时间、工程设计和建造的劳务费、运营和承包人员的编制、摊销期、燃料燃耗、退役和废物管理费用、适用的信用/违约罚金（例如为所避免的排放或工业利益发放的抵免）等。此外，在决定进行 INS 开发投资时，（为 INS 产品的）成本估算还应包括具有适当回报率的开发费用。

对于一个 INS 而言，其中很多成本，特别是在开发的初期（见第 4.5 节），可能有一些不确定值，因此可能包括或需要列出估计的范围。因此，评价成本潜在变化的影响时应进行灵敏度分析。这种灵敏度分析可用于确定各成本决定因素的相对重要性，还可用于确定成本降低的机会。成本确定因素的完整性和范围可作为衡量 INS 设计成熟度的尺度。随着 INS 开发各阶段的进展（概念、可行性、原型、一种设计的首台装置），成本估算将被逐步细化，不确定性也将逐步降低。但是，随着 INS 的不断发展，估算它的成本是确认其成本具有竞争性的重要的和必需的环节。

本节末尾还要讨论有关成本准则的其他考虑。

经济性用户要求 UR1.2：推广应用 INS 所需的总投资（包括建设期的利息）应当是这样的：可以筹集到必要的投资资金。

投资者在评价投资时，应关注各种财务指标，包括内部收益率（IRR）、与 IRR 密切相关的净现值（NPV）、还本期、投资回报率（ROI）等。某一给定地区所使用的财务指标将反映某一给定国家/地区的投资环境和要求，包括投资资金的来源。在一些国家/地区，INS 将要求私人部门投资，而在另一些国家/地区，INS 可能要求政府投资或担保。私人部门投资者可能被有竞争力的 IRR 所吸引，只要 IRR 与他们对相关的风险判断相称。正如上文所指出的，NPV 和 IRR 是密切相关的，但是净现值分析可以促使对其他好处（例如政府投资者可能比私人部门投资者更感兴趣的能源供应安全和技术开发）进行考虑。作为 IRR 的一个补充指标，投资回报率（ROI）可能是有吸引力的，因为与 NPV 相比它更独立于 IRR。最终，可接受限度就是，对某一给定的 INS 所选择的财务指标的值与其他可竞争能源技术中的投资相比应更具有吸引力。因此，这些指标值最好要优于其他可竞争能源，至少必须是相当的。

采用某一给定的 INS 或其组成部分所需要的总投资包括使该设计适于给定场地的费用、以及随后对装置进行建造和调试所需费用（包括建设时期的利息）。后者取决于建设时间和调试时间。什么是构成可接受的投资“规模”的普遍适用准则通常不能在事先确定，因为该准则随时间和地区而变化并取决于很多因素，如可供采用的其他替代方案等。但是必须做出判断，即能够在某一给定的预期投资环境内筹措完成项目所需要的资金。影响这种能力的因素可能包括某一给定地区/国家的总体经济状况、与电力公司每年现金流量相关的投资规模（因而与电网规模相关的机组规模）、以及与其他可用能源供应所需要的投资规模的比较。当与其他能源供应所需要的投资相比较时，不同选项的建设和调试期间的现金流量是重要的。进行这些比较的一种方法是使用选项的贴现建造成本。在制订具体发展准则时值得注意的是，可以根据历史上在这个地区投资的概况，特别是在能源供应方面的投资情况，判断在某一给定地区为某一数额的投资筹集资金的能力。最后，在某一给定投资环境中，在考虑了其他投资选项和其他优先事项要求占用一定份额的可用资本的情况下，对 INS 的投资必须仍然是支付得起的，且更具有吸引力。

经济性用户要求 UR1.3：考虑到对其他能源项目的投资风险，INS 的投资风险对投资者应该是可接受的。

投资者的风险由若干因素组成，其中包括基本项目费用、项目延迟费用和电厂开工不足等方面存在的不确定性。一旦不能满足诸如与安全、环境等有关的基本要求，监管的不确定性可能对这三个因素都会有影响。因此，证明与要求（例如 INPRO 基本原则和用户要求）的一致性，对于降低装置运行风险以及监审风险都是很重要的。总之，原型装置或首台装置的建造和运行将提供信心，即表明了技术风险已得到控制，并为在原产国申请预备许可证奠定了基础，这样就进一步降低了更大规模推广应用的风险。因此，人们期望，对一种技术的充分示范应该作为技术创新和推广过程的一部分。

经济性用户要求 UR1.1 讨论了项目基本成本估算的不确定性，正如在那里指出的那样，应采用灵敏度分析方法估算成本的潜在变化，而且评价风险时也应考虑这些分析结果。这种灵敏度分析可以延伸到评价财务指标（例如：IRR）对各种成本参数（包括隔夜造价、项目执行时间、贴现率等）变化的灵敏度。预期这种分析结果将影响经济性用户要求 UR1.2 中要求的财务分析中所采用的最低预期资本回收率。因此，到现在还没有规定与项目成本估算有关的单独的准则。

项目延迟会导致费用超支，特别是项目管理和工程支持费用及 IDC 方面的超支。建造和调试期间的项目延迟产生的影响最大，特别是对 IDC 的影响。因此，建造新的设施并使其投入运行（从而开始产生效益）所花费的时间应现实可行尽量短，可以并应该确定一些具体目标作为 INS 的发展目标。

在评估设计、建造和调试一座新装置所花费的时间时，需要认识到，与采购、建造、安装、人员配备和调试新设施要求的投资相比，前端设计工作、环境评价和办证虽然投资相对较少，但所耗费的时间可能很长。调试在整个程序结束时进行，届时投资资金的大部分已经花掉，并且此时建造期间积累的利息最高，所以尽量缩短调试期是非常重要的。

不同的装置设计可能具有不同的项目执行时间。对于有先例可供参照的项目而言，反应堆项目的建造时间已短到 52 个月（第一罐混凝土至临界），调试期（首次临界状态至满功率）的时间缩短到 2—3 个月。因此可以合理推断，在不久的将来把（至少是反应堆的）建造期缩短到 48 个月是可以实现的目标。在适当的

时候，采用创新技术并使用工厂加工模块建造，对有先例可供参照的电厂而言，将建造期缩短到 36 个月也是可以实现的。

另一个需要考虑的因素是政治环境是否支持使用核电及这种支持是否能在有意义的时间范围内持续。在判断环境是否给予支持时，可以考虑各种指标。例如：国家的能源战略是否承诺核电是其能源供应的基本组成部分？执政党和主要反对党是否都支持核电？对争议问题的讨论（如废物终态管理设施的选址问题）是否取得进展？

经济性用户要求 UR1.4：*INS 应适合于满足不同市场要求。*

考虑到未来的不确定性，正如大量的可能未来情景（在 SRES 见参考文献[4-6]和参考文献[4-8]中的第 4.1 节中考虑的）中所反映的那样，INS 应具有足够的灵活性，以便尽可能为各种可能的未来和市场提供具有竞争力的能源。因此，除了 INS 具有总体适应性外，还希望具有对 INS 的特定组成部分进行调整的能力，以便能适应不同规模的模块、不同的市场变化和增长情况，采用不同的燃料以及满足不同的能源应用和不同国家/地区的需求。在评估某一组成部分或整套组成的灵活性时，应当考虑该组成部分或整套组成部分与 INS 其他组成部分之间可能存在的协同作用。

4.4. 有关成本准则和目标的其他考虑

成本不是静止的，而是随时间变化的。原则上，在用 LDC 计算 C_N 和 C_A 进行现金流量分析中可以考虑这些变化。但是，某个成员国已经注意到，在其他竞争能源的 LDC 对燃料费用敏感的情况下（例如联合循环燃气轮机），而且预期燃料费用未来会有显著增高，对 INS 的 LDC 与竞争能源的预期年平均成本进行比较以确定系统的竞争地位如何随时间而变化是很有帮助的。在这种情况下，一个明显的好处可能来自预先许可证申请和 INS 场址选择工作，特别是如果 INS 的建造和调试时间短的话。然后，电力公司便可对照核系统的 LDC 跟踪高燃料费用选项不断上升的运营成本，因此在做出建设决策时更加确信，具有竞争性的优势已转向 INS。从做出此类决定到核电厂发电之间的时间越短，电力公司做出这种承诺所面临的风险就越小。

根据当地或国家的主要竞争能源技术的性质，可以针对某一特定时间点和特定的国家/地区确定确切的成本决定因素（例如比投资）的可接受限度。这里应

该注意的是，核的基建费用高使得它的 LDC 对贴现率较为敏感，而化石燃料电厂的 LDC 对燃料费用较为敏感[4-7]。

从很多成员国的近期至中期（今后 20 至 50 年）目标来看，化石燃料电厂（例如燃煤或联合循环燃气轮机）可能是核电生产的主要竞争对手（见参考文献[4-8]第 4.1.1 节）。因此，在保持低的燃料费用、运行与维护费用以及废物管理和退役费用的同时，降低核电厂的比投资将改善 INS 的竞争地位。

正如第 2 章“INPRO 与可持续性概念”中所表明的那样，在 SRES 情景中，预测可再生能源（例如：水电、风能、太阳能、生物能）将大幅增加它们在全球能源供应中的份额，特别是在 21 世纪下半叶。因此，从较长期看，光电能和风能等可再生能源可能是核能的主要竞争对手。这些技术的特点是燃料费用低（如果不是零），而且如果得到成功开发，维护费用也会很低。主要成本是建造和安装成本，包括备选储备系统和/或替代能源来源的成本以及土地使用“成本”。由于可再生能源的内在性质，风能和太阳能等可再生能源不能连续生产电力。所以，在它们获得市场份额后，提供后备能源的重要性将日益增加，并且必须考虑这样做的成本。由于核技术拥有比可再生能源技术更高的容量因子，因此这是核技术一项有竞争力的优势。在最近几年中，核能的平均可利用因子已超过 90%。采用 INS，甚至可以达到更高的可利用因子——约 95%。

在一些管辖区，土地占用可能是一个重要的因素，在这种情况下，它可以作为一个指标来采用。有时可被作为“租金”来对待，因此，实际上，它变得与燃料费用类似。换句话说，土地使用成本可视为业主的成本。对于某一给定的电厂占地面积来说，由于核技术在单位土地面积上的装机容量（MW(e)/公顷）超过了可再生能源，因此这也是核技术的一项有竞争力的优势（例如：见参考文献[4-9]）。

如果核能的总单位能量成本是具有竞争力的，在能量生产设备——反应堆——中使用的燃料的费用必须保持低水平。核电厂的运营者将成为燃料循环设施产品的用户，创新型燃料循环与其他燃料策略相比必须有竞争力，并可与备选反应堆设计相配套。因此，核燃料循环设施（除反应堆外）的基建费用以及运行和维护费用必须足够小，以便使反应堆运营者的燃料费用具有竞争力。燃料循环设施也产生需要进行安全管理（包括将其置于安全的终态）的废物，在适当的时候，该设施必须退役。所有这些活动和有关的废物管理设施的成本必须使燃料费

用保持具有竞争力。

总之，很清楚的一点是，对于 INS 而言，基建费用、运营和维护费用、燃料费用、废物管理费用和退役费用从单项成本和整体成本来讲必须足够低，以便使能源产品的总单位成本具有竞争力。因此，从经济角度来说，INS 需要降低隔夜造价、缩短建造时间，从而减少建造期间的利息、减少运行和维护费用、提高寿期的平均可利用率、延长电厂使用寿命，但这些都不能以牺牲安全或环境性能为代价。

4.5. 经济性与开发周期

INPRO 基本原则、用户要求和准则可作为工具使用，以便帮助投资者（无论他们是政府还是企业）评估是否对 INS 的研究、开发、设计和推广应用投资。因此，（例如）参与决定是否给 RD&D 投资开发某一给定系统或组成部分的决策者们需要信息以表明，一旦 INS 开发出来，在未来推广应用 INS 的时间内，INS 所提供的产品（即能源）的成本与其他能源相比具有竞争力。一旦 INS 充分开发出来，需要做出是否承担对其推广应用的决定。在大多数（如果不是全部的话）成员国中，这将涉及到另一组投资者，简单地说，因为推广应用是一个分为两个步骤的过程——开发者在某一给定市场提供 INS 和用户购得该技术。技术用户在决定采用某一给定的 INS 时需要确信：一旦 INS 建成、经过调试并投入使用（需要几年的过程），INS 将以有竞争力价格提供其产品，并能够使技术用户获得适当的回报。

在这方面，最好应简要考虑使 INS 达到大规模推广应用的地步需要经历的各个阶段（见第 3 章“评估方法”）。首先，进行初步工作以确定 INS 的概念设计。这种工作通常由拥有（例如在国家实验室和大学的）重大核电计划的成员国国家政府出资。这种工作的成果是需要对所建议的 INS 满足国家和国际要求的能力进行评估，这些要求包括 INPRO 基本原则、用户要求和准则中规定的，还要外加一些成员国可能现有的或进一步发展的要求。这种评估也需要明确不确定性以及这种不确定性的潜在影响，例如采用灵敏度分析。因此，INPRO 基本原则、用户要求和准则可用于帮助决策者作出是否给 RD&D 投资的最初决定，以推动初期阶段后的 INS 的开发。INS 的支持者可能向一些可能的来源——政府和/或企业——寻求资金和帮助以推动 INS 的开发。在早期阶段，开发工作可以获得足够的内部资金，但在后期阶段，内部资金可能由外部资金补充或取代。

总的来看，各部门的开发时间不同，而且开发工作越具有创新性，相应的开发时间就将越长，开发工作能否获得成功的不确定性（包括实际开发成本在早期阶段的不确定性）就越大，即成功开发所面临的风险就越高（见第 3 章“评估方法”中的表 3.3，该表概括了技术开发和推广应用的不同成熟水平）。

核技术的开发时间可能延续几十年。因此，开发越创新，寻求政府给予各种形式支持的可能性就越大。由于开发决定就是向 RD&D 投资的决定，因此必须估算 RD&D 的成本并且论证向 RD&D 投资会有适当的回报。就企业投资而言，要求进行财务分析，以证明预期将获得财务回报。政府投资的正当理由可能部分是财务原因，但是大部分可能是依据预期要实现的战略利益，例如工业生产能力的保持和发展、能源供应的安全和多样化。

随着开发的进行，需要利用从 RD&D 得到提高的知识基础进行定期再评估，以确认目标仍然预期可以达到，并且对未来的投资做合理的调整。在整个过程中，开发者与潜在用户的密切接触（即市场）将利用有用的方法来保证用户的需要得到理解和满足。在某一阶段，将要求承诺建造一种设计的首座装置（FOAK）。在做出这个决定之前，应具备大量资料用于验证 INS 的关键系统或组成部分（可能包括建设原型装置），随着这些系统/组成部分得到评估和验证，有关是否为进一步的开发和示范提供资金的决定将全部或部分地取决于重新评估的结果，即开发目标（INPRO 基本原则、用户要求和准则）是否仍然可以达到。

在使用政府资金开发时，随着某一特定的 INS 向 FOAK 装置的方向发展，投资的资金来源可能会发生变化：随着不确定性因 RD&D 工作的开展而不断降低，预期企业将接受更大份额的投资。所以，随着开发工作的进展，决策者的结构可能发生很大变化。在开始建造 FOAK 装置时，决策者几乎肯定会发生变化，因为按照定义，FOAK 将是“商业”装置，所以将涉及用户（即客户，例如电力公司）的投资。但是，根据察觉的风险，仍然需要某种形式的政府帮助或开发者与客户共同承担风险来说服用户建设 FOAK 装置。

为方便说明，可以假设，建设一座 FOAK 装置将要求开发者、客户/电力公司和政府共同承担（改进/完成设计、建造、调试和运行等）成本和/或风险。各方将需要确信其投资可以得到回报。各方将从自己的角度来看待这个问题。在所有情况下，不同的决策者/投资者都期望，一旦装置运行，它将满足 INPRO 基本原则、用户要求和准则等要求。但是在对基本原则、用户要求和准则，特别是对

与经济性有关的内容进行评估时，各方可能存在某些差异。例如，政府可能考虑伴随产生的相关效益，而电力公司可能考虑其投资的回收率，开发者将需要得到保证，即他将从以后新建装置的销售和服务中收回完成 FOAK 装置所花费的任何附加投资（理想的是，收回为 RD&D 工作所支付的沉入成本）。

一旦建成 FOAK 装置，未来核电装置的决策者/投资者将再次发生很大变化，因为此时的决策将是客户与供应者通过商务谈判做出的更加商业化的决策。政府可能仍会或多或少参与一些，例如，提供贷款担保或在国际销售时帮助融资。此外，客户想要确认其要求将能得到满足，而且，根据从 FOAK 得到的经验，风险应更低，因此客户的信心更高。然而，由于客户对核的经验和了解不同，因此情况也可能不尽相同。

如果客户已经是一个核技术的老用户，他可能愿意接受一个 INS，只要他判断这样做的潜在风险可以被利益抵消。在另一方面，如果 INS 客户是第一次使用核技术的用户，做出是否获得某一特定 INS 的决定可能是比较复杂的。与向比较有核经验的客户提供的建议相比，向这种第一次客户所提供的建议可能会有很大不同。这种第一次客户可能是特定技术的后期采用者，只有当技术进入完全商业化推广阶段后，他才可能打算获得 INS（或其组成部分）。即使到那时，他可能还要求供应者提供具体的支持和技术转让，甚至要签订电厂的运行和维护的合同（还请见第 9 章“国家、地区和国际的基础结构”）。但是，这个客户最终一定会确信，他得到的电厂将提供在其市场上（现有的或预期的）有竞争力的产品，并确信在那个市场的价格结构条件下，他将获得适当的回报。

第 4 章参考文献

[4-1] OMOTO, A., Improving Economics of Nuclear Power–Towards Safe, Efficient and Professional Operation, The European Nuclear Conference, Paris (2002).

[4-2] MEDLOCK, K.B.III and HARTLEY, P., The Role Of Nuclear Power In Enhancing Japan’s Energy Security, The James A. Baker III Institute For Public Policy Of Rice University, http://www.rice.edu/energy/publications/japanenergysecurity_nuclear.html, (2004).

[4-3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants 1999 edition, Technical Report Series No. 396, IAEA, Vienna (2000).

[4-4] MESSNER, S., and STRUBBERGER, M., User’s Guide for MESSAGE III, WP-95-69, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1995).

[4-5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Wien Automatic System Planning (WASP) Package, A Computer Code for Power Generating System Expansion Planning,

User's Manual, Computer Manual Series No. 16, IAEA, Vienna (2001).

[4-6] INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, Special Report on Emission Scenarios, A special report of working group III, Cambridge University Press, Cambridge (2000).

[4-7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Economic Competitiveness of Nuclear Power, Moving Targets”, H.H. Rogner, L. Langlois, IAEA Bulletin, Vienna (2000).

[4-8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, IAEA-TECDOC-1362, Vienna (2003).

[4-9] TRAINER, T., Can solar sources meet Australia’s electricity and liquid fuel demand?, International Journal of Global Energy Issues 1 No. 1 (2003) 78.

第 5 章

核设施安全

5.1. 引言和背景

INPRO 计划已经为 INS 的安全性制定了基本原则、用户要求和准则，它考虑了涉及现役反应堆和燃料循环设施安全问题的大量已有工作，以及以前为下一代反应堆制订要求的工作。

INPRO 的基本假设之一是，预期为了满足今后 50 年或更长时期内的可持续能源供应需求，投入运行的核能系统（NES）的数量将比目前大幅增加。如果把新采用的 NES 的安全水平维持在与现役系统的相同水平上，就会导致核事故的数值风险总体上升。不过，可以预计，由于创新核能系统安全水平的提高，并且部分根据从在役系统上得到的经验和教训，预计计算得到的风险会由此得到抵偿。

5.1.1. 现有的要求

IAEA 更新了那些详细规定确保核电厂安全所需要素的文件[5-1，5-2]。在国家层次上，许多电力集团编写了相应的用户（或电力公司）要求文件，这些文件得到从过去 40 年核电厂建造、许可证申请和运行中获得的经验（10000 多反应堆堆运行年）的支持。

为渐进型和创新型设计准备这些文件的组织有：美国电力研究所（EPRI）（《先进轻水堆电力公司要求文件》——ALWRURD）、日本的一些电力公司（日本电力公司要求文件——JURD）、大韩民国的一些电力公司（韩国电力公司要求文件——KURD）、中国的一些电力公司（中国电力公司要求文件——CURD）和欧洲的一些电力公司（《欧洲电力公司要求》——EUR）。它们主要由发电公司著述，源于经过充分表征的反应堆设计，反映了运行经验，成为现代化设计开发的基础。

2004 年，IAEA[5-3]提交了一份有关这些电力公司文件的综述报告。以下概括介绍了这些要求的基本要点。

- 设计寿命为 60 年；
- 运行灵活可靠，总设备利用率高，非计划停堆水平低，换料停堆期短，可控制性高（例如，100%—50%—100%负荷跟踪能力），运行周期延长至 24

个月；

- 提高安全裕度以降低对扰动的敏感度和减少安全挑战的次数；
- 改进后的自动化和人-机接口，与增加了的安全裕度一起，将为操纵员在事故/事件情况下采取行动提供更多时间，并且将降低操纵员操作错误的概率；
- 堆芯损伤频率低于 10^{-5}/堆-年，且损伤后大量释放的累积频率低于 10^{-6}/堆-年；以及
- 应对严重事故的设计措施。

在某一特定方面，欧洲的要求和美国的要求具有明显的差别。出现差别的原因是欧洲的人口密度较高，使欧洲电力公司提出了下述一些更严格的释放目标：

- 在安全壳发生早期释放过程中，把在距离反应堆 800 米以外实施的应急保护行动限制到最低；
- 从反应堆算起的约 3 千米以外，任何时候都要避免随后的行动（人的暂时转移）；
- 在从反应堆算起的 800 米以外的任何距离处，避免涉及公众的持久（超过 1 年）重新安置的长期行动；以及
- 确保对食品和农作物消费的限制在时间上和土地面积上是有限的。

5.1.2. 未来的要求

INPRO 的范围涵盖预计在今后 50 年及以后服役的核反应堆，以及相关的燃料循环。人们认识到，现有的 [8]、渐进型的和创新型设计在此时期内都会存在并运行。最近出版的“三机构研究报告”[5-4]概述了 INS 开发中目前的趋势。具有创新型设计特性的反应堆系统范围将包括用于不同目的，不同规模的水冷、气冷、液态金属冷却系统和融盐反应堆。

人们普遍认为，为使核电的广泛和长期应用获得可持续性，需要一个至少把易裂变材料的增殖、后处理和再循环作为一个环节进行利用的核燃料战略。某些国家或地区在中期内将实施以改善安全、防扩散和实物保护为特点的创新型一次通过式燃料循环战略。然而，最后，创新型反应堆和燃料战略的制订和实施将包括充分利用铀、钍资源的闭合燃料循环。

现有核电反应堆的用户要求已充分制定。预计给定反应堆设计的供应商会在该堆型所有层次上满足一切用户要求，即使是在详细设计程度上的例外都不常

[8] “现有的”一词本节将一律指截止 2004 年最现代的可商业应用的设计和运行中的反应堆。

见。另一方面，虽然从今天的情况来看，现有的核燃料循环装置总的来说能够满足安全的高标准要求，但是迄今尚没有被广泛接受的用户要求。本节将 INS 的用户要求应用到反应堆和燃料循环设施中。准备尽可能将这些用户要求写成通用性要求；在通用性不够充分的地方，将有相应的说明。

本节的范围包括反应堆安全，前端和后端燃料循环活动（包括燃料制造和后处理）的安全；它虽然扩展到乏燃料反应堆场区的最初贮存，但不包括第 7 章“废物管理”中提到的延长的燃料贮存和废物管理。

5.2. 实现安全的一般方法

5.2.1. 安全总目标

全世界已在**核安全总目标**上达成共识[5-5]，即：

通过在核装置中建立和维持对辐射危害的有效防护措施，保护人员、社会和环境免受损害。

这个安全总目标适用于现有的系统，同样也适用于创新型反应堆和燃料循环设施。它引出两个补充性的安全目标，一个是辐射防护方面的安全目标，另一个是技术方面的安全目标。这两个目标是相互依赖的。

辐射防护方面的安全目标是，确保在所有运行状态中使辐射照射量保持低于规定限值并且从经济和社会因素考虑是合理可行尽量低的（ALARP）；以及，确保事故的辐射后果得到缓解。

技术方面的安全目标是，采取一切合理实际的措施预防事故发生，如果发生事故要缓解其后果；就装置设计中所考虑的一切可能的事故（包括概率极低的事故）而言，以较大的把握确保任何放射后果将很小或低于规定限值；并且确保发生严重放射后果的事故的可能性是极小的。

5.2.2. 基本安全功能

就核反应堆而言，其基本的安全功能是：控制反应性；排除堆芯热量；包封放射性物质和屏蔽辐射。

就燃料循环装置（包括乏燃料在反应堆场址水池中的贮存）而言，其基本的安全功能是：将工况控制在次临界状态并控制化学反应；排除放射性核素产生的衰变热；以及包封放射性物质和屏蔽辐射。

为确保充分地执行这些基本的安全功能，应该实施有效的纵深防御战略。就

INS 而言，纵深防御应该适当地包括，增加内在安全特性和非能动系统在核设计中的应用。

5.2.3. 纵深防御

提供纵深防御（DID）是核装置的安全措施和特性的总战略[5-6]，[5-7]。这一战略包括两方面内容：第一，预防事故；第二，如果预防失败，则限制事故的潜在后果，并防止其演变成更严重的事故。事故预防是首要的，因为防止装置状态偏离熟知的运行工况的预备工作一般比用来缓解这些偏离的措施更有效和更易于预测——当装置或部件的状态偏离正常工况时，装置的性能一般将会恶化。因此，预防装置状态和性能的恶化，通常就是对公众和环境的最有效的保护。就 INS 而言，与现有的设计和装置相比，应该提高预防性措施的有效性。

如图 5-1 所示以及下文所述，纵深防御一般具有 5 个保护层次。最高层次是预防，其余 4 个层次是对装置和公众安全挑战不断增大的响应。

为避免故障蔓延到后续层次，确保纵深防御战略中各个保护层次的独立性是至关重要的。在现有反应堆中，一个事故能够同时威胁纵深防御的几个层次。在 INS 中，纵深防御的各层次的独立性应当更强。就某些概念而言，这个目标或许可部分地通过内在安全特性和非能动系统的更多应用，以及通过冗余系统间的更大分离来实现，这些都具有将事故防御推到最高层次的作用。

内在安全特性的更多应用将加强创新核装置中的事故预防能力。如果一种装置使一种危险实际上不可能发生，则该装置具有应对这种潜在危险的内在安全特性。内在安全特性可通过选择核燃料、冷却剂以及其他部件的核物理学以及理化性质而实现。内在安全性这个术语一般用来指一种具体的性质，而不是指整个装置。例如，如果一个部位没有可燃物，它对火灾来说便是内在安全的；如果过剩反应性的实际可使用量较小而且总反应性反馈是负的，因此不可能发生大的功率激增，那么反应堆对反应性引入来说具有部分的内在安全性；如果衰变热能够通过传导、热辐射和自然对流转移到环境中而不损伤燃料，反应堆对冷源的丧失便是内在安全的；如果核燃料循环设施的任一部位都不存在材料的临界构形，它对临界便是内在安全的，等等。

在安全评估中，评估的范围应该是全面的，要涵盖整个燃料循环对人和环境的影响（在有关环境的第 6 章中考虑）。这就保证了燃料循环的某一区域或环节的安全性的改善不会因为另一个区域的安全性的降低而失效。

图 5.1 列出了 INS 安全性用户要求的框架。

图 5.1. 制订 INS 安全性用户要求框架

INPRO 已经为加强现有装置与设计的纵深防御制订了总的创新方向。这些创新方向列于表 5.1。目标将是，预防、减少和限制放射性释放，以将 INS 的健康与环境风险降低到与用于类似目的的工业设施同样的程度，因此 INS 将没有必要在装置场区以外采取搬迁或疏散措施，而只须采取与任何工业设施制订的那些一般性应急措施一样的措施。

5.2.4. 用于燃料循环设施（反应堆以外的）的基本安全方案

燃料循环设施（FCF）中的典型安全危害包括放射性释放、工作人员被沾污和照射、临界以及化学和贮存能（例如放射衰变加热，包括着火在内的化学反应，加压系统的故障）的释放[5-8]。在创新型燃料循环装置中，应该使用与现有设施类似的技术和方法来限制危害，因为创新型设施将从一些已经证实的技术设计解

决方法中受益。应该利用内在安全特性，并尽可能多地利用非能动安全系统。在50年时间框架内，燃料后处理和制造设施的自动化程度要比现在高得多。在中期内，手动操作不可能完全取消，因此应该多强调行政管理程序的作用，包括明确界定运行控制方面的责任和适当的培训。

表 5.1. INPRO 在应用纵深防御方面的创新

<table>
<tr><th>纵深防御层次</th><th>INSAG 目标（见文献[5-6]）</th><th colspan="2">创新方向（INPRO）</th></tr>
<tr><td>1</td><td>预防异常运行和故障</td><td>通过更强调内在安全设计特征和非能动安全特性，以及在装置的日常操作中进一步减少人为行动来加强预防。</td><td rowspan="5">各层次在彼此间拥有更大的独立性</td></tr>
<tr><td>2</td><td>控制异常运行和探测故障</td><td>优先考虑具有更高的可靠性、智能化和能够预测和补偿异常瞬态的先进控制和监测系统。</td></tr>
<tr><td>3</td><td>控制设计基准内的事故</td><td>通过能动和非能动设计特性的优化组合实现基本的安全功能；限制燃料故障之类的后果；通过增加宽限期（例如在若干小时和若干天之内）将对人为干预的依赖减少到最低限度。</td></tr>
<tr><td>4</td><td>控制严重装置工况，包括预防和缓解严重事故的后果。</td><td>提高复杂事故序列控制和监测系统的可靠性和能力；减小严重装置工况的预期频率；例如，就反应堆而言，严重堆芯损伤频率至少比现有装置和设计降低 1 个数量级，而且城市中的设施的降低程度更大[9]。</td></tr>
<tr><td>5</td><td>缓解放射性物质大量释放的放射后果。</td><td>不需要在装置场区外采取疏散或搬迁措施。</td></tr>
</table>

普遍一致认为，纵深防御战略也将用于燃料循环设施，但这种战略应该考虑燃料循环设施和反应堆之间的重大差别，即：

- 燃料循环设施中的功率密度比反应堆堆芯低若干个数量级；
- 与反应堆相比，燃料循环设施的固体结构的整体储存能量和运行过程中流

[9] 同样地，应为燃料循环设施选择一个适当的目标。

体或气体的焓较小；

- 与反应堆相比，燃料循环设计中的放射性材料经常处于更易分散的状态，进出燃料循环设施的放射性材料流（体积和质量）更多，而且阻止其进入环境的屏障较少，尽管放射性材料的浓度很低，尤其是在燃料循环的前端；

- 有些燃料循环设施使用联氨和硝酸之类具有强反应性或可燃性的化学品。

这些差别导致以下后果：

- 由于操纵员要接触加工过程中的材料，需要特别注意燃料循环设施内的职业风险；

- 由于机械或化学工艺过程，来自铀矿之类燃料循环设施的危害性物质的例行排放可能较大；

- 燃料循环设施中发生化学能释放（例如火灾、爆炸）的可能性较大；

- 由于释放的能量少得多，因此燃料循环设施中临界事故的潜在后果要比反应堆中的临界事故小得多。

这些差别导致了对安全方法的修改。如上所述，对于现有的燃料循环设施来说，强调用管理和操纵员控制的方法控制运行以确保安全（这与反应堆中所用的专设安全设施不同）。考虑到易裂变材料具有更大的流动性（分配和转移），也更多地强调预防临界。

由于与工艺过程（可能包括例行处理过程中对核材料的无遮盖搬运和转移）中的核材料密切接触，因此应注意确保工作人员的安全。应控制放射性物质的可能摄入，以预防和尽量减少污染，并且确保不超过运行剂量限值。此外，释放到设施中的和通过各种受监测的和不受监测的途径释放的放射性物质会对人员造成不可忽视的照射，尤其是来自长寿命放射毒性同位素的照射。

核设施中保护环境和人员所需的实体屏障的层数取决于潜在的内部和外部危险以及故障的潜在后果。因此，对不同类型的核反应堆（例如，高功率堆芯反应堆或低功率堆芯反应堆[10]）和燃料循环设施而言，屏障的层数和强度将是不同的。例如，在天然铀燃料循环的前端，安全方面的努力注重于预防通过低放物质扩大污染。在采矿过程中，一个工作重点是预防地下水或地表水被来自铀尾矿的排放物所污染。多种化学品和铀副产物是转化阶段的潜在危险。在燃料制造设施中，安全方面的努力也是注重于预防来自燃料制造过程的废物造成的污染。INS

[10] 就现有轻水反应堆而言，多屏障概念包括 4 个部分：燃料基体；燃料棒包壳；一次冷却剂边界和安全壳。

可能采用的用于缓解这些危险的方法是，把前端设施（例如富集和采矿设施）和后端设施（例如后处理和废物管理设施）建在同一个地点上。这样做将有若干好处，例如可以把贫化铀与尾矿放在一起处理。

总之，在燃料循环设施中，纵深防御的 5 个层次的相对重要性会与核反应堆设施有所不同。不过基本战略仍将是相同的，即：所有保护层次都应该实施。此外，在确保纵深防御的不同层次间的独立性方面，应该减少对人的行动的依赖。

5.3. 创新型核能装置在安全性方面的基本原则、用户要求和准则

5.3.1. 引言

在创新型反应堆和燃料循环设施的安全性方面，已确定了一套基本原则、用户要求和准则，其中的焦点是对 INS 来说最有可能发生变化的要求，它们能反映预期的核技术变化。预计要把现有实践中的“安全文化”概念和相关的要求“拿过来” [5-9，5-10，5-11]。还预计，在适用的情况下，仍将遵循 IAEA 的一些安全标准和导则文件（例如参考文献[5-1]，[5-2]，和[5-3]）中的要求和实践。这些标准和导则对（例如）允许的燃料故障率和瞬态后恢复运行的能力等问题提供了详细的指导。预计这套基本原则、用户要求和准则适用于任何类型的创新型设计。它将促成能与用户沟通和被用户接受的合适的安全性水平（亦见第 3.2 节）。

关于 INS，人们预期 INPRO 的要求和准则最终将以 IAEA 创新反应堆和燃料循环设施安全标准和导则的形式表述。反之，随着 INPRO 方法的发展，它将受益于和反映出 IAEA 标准和导则的发展。

5.3.2. 安全性基本原则

创新型核能源系统的装置应：

1. 将加强的纵深防御作为其基本安全方法的一部分，并确保纵深防御中各保护层次之间将比现有装置更加彼此独立。

2. 通过酌情在其设计中更多地强调作为其基本安全方法的一部分的内在安全特性和非能动系统，并在安全性和可靠性上超过现有的装置。

3. 确保建造/调试、运行和退役期间给工作人员、公众和环境造成的辐射照射风险与用于类似目的的其他工业设施造成的风险相当。

此外，INS 的开发还应：

4. 开展相关的研究、开发与验证（RD&D）工作，以便把对装置特性的认

识以及用于设计与安全评估的分析方法的能力至少提高到与现有装置相同的置信水平上。

5.3.3. 每项基本原则下的安全性用户要求和准则

下文将把与上面确定的各项基本原则对应的用户要求和准则列于表 5.2 和表 5.3，然后作简要介绍。

表 5.2. 与安全性基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">安全性基本原则 1（BP1）：INS 装置应将加强的纵深防御作为其基本安全方法的一部分，并应确保纵深防御的各保护层次之间将比现有装置更加彼此独立。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR1.1[11] INS 装置在系统和部件故障以及运行方面，应该比现有设计更牢固。</td><td>1.1.1.设计的牢固性（简化度，裕量）。
1.1.2.运行的高质量。
1.1.3.检查能力。
1.1.4.预期故障和扰动的发生频率。
1.1.5.直到需要人采取行动为止的宽限期。
1.1.6.应对瞬态的惰性。</td><td>1.1.1 到 1.1.6：
至少在正文中讨论的某些方面超过现有设计。</td></tr>
<tr><td>UR1.2[12] INS 装置应能探测并且中止对正常运行状态的偏离，以防止预期的运行偶然事件升级为事故工况。</td><td>1.2.1. 仪表控制系统和/或内在特性探测和中止和/或补偿这类偏离的能力。</td><td>1.2.1.与安全相关的关键系统变量（例如流量、压力、温度、辐射水平）不超过连续运行可接受的限值（不需要报告事件）。</td></tr>
</table>

[11] 对应纵深防御层次 1：“异常运行和故障预防”，表 5.1。

[12] 对应纵深防御层次 2：“控制异常运行和探测故障”，表 5.1。

续表 5.2. 与安全性基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">安全性基本原则 1（BP1）：INS 装置应将加强的纵深防御作为其基本安全方法的一部分，并应确保纵深防御的各保护层次之间将比现有装置更加彼此独立。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR1.3[13] 应降低事故的发生频率，使之与总安全目标相一致。如果有事故发生，专设安全设施应该能够将 INS 装置恢复到受控状态，并且随后达到安全的关闭状态，还要确保对放射性物质的包封。对人为干预的依赖应该是最低限度的，并且只是在一定的宽限期以后才需要。</td><td>1.3.1.计算的设计基准事故发生频率。
1.3.2.直到需要人为干预时为止的宽限期。
1.3.3.专设安全设施的可靠性。
1.3.4.能发挥功能的包封屏障的个数。
1.3.5.专设安全设施将 INS 恢复到受控状态（无操纵人员行动）的能力。
1.3.6.次临界裕量。</td><td>1.3.1.能够引起装置受损的事故频率比现有装置低。
1.3.2.比现有装置有所增加。
1.3.3.等于或超过现有装置。
1.3.4.至少为 1。
1.3.5.足以达到受控状态。
1.3.6.足以应付各种不确定性，并提供足够的宽限期。</td></tr>
<tr><td>UR1.4[14] 应降低由内部事件引发的放射性向 INS 的安全壳/包封设施大量释放的频率。如果发生释放，应缓解其后果。</td><td>1.4.1.放射性物质向安全壳/包封设施大量释放的频率。
1.4.2.自然或专设过程足以控制相关系统参数和安全壳/包封设施中的活度水平。
1.4.3.装置内部严重事故的管理。</td><td>1.4.1.至少比现有设计低 1 个数量级；
对城市场址中的装置，应该更低。
1.4.2.有这类过程存在。
1.4.3.程序、设备和培。足以预防向安全壳/包封设施外大量释放放射性和恢复设施控制。</td></tr>
</table>

[13] 对应纵深防御层次 3：“事故控制”，表 5.1。

[14] 对应纵深防御层次 4：“预防大的放射性释放”，表 5.1。

续表 5.2. 与安全性基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">安全性基本原则（BP1）：INS 装置应将加强的纵深防御作为其基本安全方法的一部分，并应确保纵深防御的各保护层次之间将比现有装置更加彼此独立。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR1.5[15] 应当对一切实践目的防止放射性从 INS 装置中发生重大泄漏，从而除了出于类似目的为任何工业设施制订的一般应急措施外，INS 装置将不需要在场区外采取搬迁或疏散措施。</td><td>1.5.1.大量放射性物质向环境释放的计算频率。
1.5.2. 计算的释放后果（例如剂量）。
1.5.3.计算的个人风险和集体风险。</td><td>1.5.1.计算频率＜10^{-6}/装置・年或在设计中已被实际排除。
1.5.2.后果小到不需要疏散。可采取适当的场区外缓解措施（例如临时的食物限制）
1.5.3 与类似装置相当[16]。</td></tr>
<tr><td>UR1.6 应该完成对 INS 的评估，以证明纵深防御的不同层次已被采用且其彼此独立性要强于现有系统。</td><td>1.6.1.纵深防御中各层次的独立性。</td><td>1.6.1.通过确定论和概率论方法、危险分析等来证明独立性是适当的。</td></tr>
<tr><td>UR1.7 INS 装置的安全运行应得到一套把人因要求系统地用于设计、建造、运行和退役的经改进的人机接口的支持。</td><td>1.7.1.在装置寿期内系统化地处理人为因素（HF）的证据。
1.7.2.来自其他行业的正规人为响应模型的应用或核专用模型的开发。</td><td>就 1.7.1 项而言：
—令人满意的评估结果。
就 1.7.2 项而言：
—正如一些人为因素模型所预测的，人为失误的可能性比现有装置有所减小。
—将人工智能用于早期诊断和实时操纵员帮助。
—与现在装置相比，正常运行和短时间事故管理对操纵员的依赖更少。</td></tr>
</table>

[15] 对应纵深防御层次 5：“预防包封失效和缓解放射学后果”，表 5.1。

[16] 例如，炼油厂与浓缩设施类似；化工厂与燃料后处理厂类似；燃煤电厂与核电厂类似。

下面，简要讨论安全性基本原则 1 及其用户要求和准则。

安全性基本原则 1（BP1）：INS 装置应将加强的纵深防御作为其基本安全方案的一部分，并应确保纵深防御的各保护层次之间将比现有装置更加彼此独立。

为补偿潜在的人或机器故障，必须采用纵深防御概念，利用若干层次的保护和连续的实体屏障来预防放射性物质向环境的释放。还应该提供一些用来保护这些屏障自身的手段。此外，还应该有进一步的事故管理措施可供使用，以便在发生严重事故时保护公众和环境免受过度伤害。

不同防御层次间的平衡优化是重要的，因此为这项基本原则提出的用户要求更强调预防性的而不是纠正性的措施或缓解性的屏障。

所以，对于未来的核装置，头 5 条用户要求旨在加强纵深防御战略，即便是在发生严重事故的情况下，也无需采取场区外的疏散措施。

安全性用户要求 UR1.1：INS 装置在系统和部件故障以及运行方面，应该比现有设计更牢固。

提高牢固性的主要手段是，要确保设计、建造和运行的高质量，包括人的表现。就创新设计而言，起始故障或扰动的预期频率应该比现有设计有所降低。这种降低可用下述多种方法来实现，例如通过：改善材料；简化设计以把故障和错误减至最低限度；改善设计裕度以便更好解决过度应力和疲劳问题；增大运行裕量；增大系统的冗余度；减小错误的人为干预造成的影响（机器应该能够承受更多的人为错误）；进行更有效的和效率高的检查；对装置状况进行连续监测。能够更好地防范某些潜在危险的反应堆概念的实例有：将所有冷却回路放在压力容器内（避免回路破裂）的设计；使用液态金属或融盐的设计（避免高系统压力）；使用小的过剩反应性（避免大幅的功率激增）；低功率密度堆芯（限制反应性瞬态时的温度）；广泛使用非能动系统（有潜在的更高的可靠性。例如自然对流）；更加可靠的自检控制系统（避免偏离正常运行）；使用不可燃材料（避免发生火灾）等。利用内在的安全特性是实现牢固性的有效手段，并且已作为一项单独的基本安全原则加以强调——见表 5.3。

“检查能力”不是意味着频率更多的检查，而是意味着系统应该要求和允许进行更有效和更智能化的检查——即通过对故障机制的充分认识来推动的检查计划，以便在正确的时候检查正确的部位。人们认识到，在 INS 的早期阶段，在全面建立技术基础前，更多的检查将是必要的。

“宽限期”指标是指在发生故障或异常运行开始的情况下在需要采取人为行动之前可供使用的时间。“宽限期”的适当值可能取决于核设施的类型、故障诊断的难易程度，以及所要采取的人为行动的复杂性。简单故障和直接行动需要的宽限期较短。例如，就创新型核电厂而言，在主给水系统丧失和成功自动转接到冗余系统之后，适当的宽限期大约是 1 天。

“惰性”指标是指一个核系统应对预期的运行事件，避免可能延期重新启动和返回正常运行的能力。压水堆与惰性有关的一个可接受限度的典型实例是：在发生甩负荷瞬变后，一回路不会发生物质流出现象；相应的设计措施是把稳压器尺寸设计得足够大。核反应堆的另一个实例是，燃料在一回路断流（主冷却剂泵故障）之类瞬变事故发生后具有的热惰性（温度缓慢升高）。后处理设施的一个实例可能是，在第一个溶剂萃取回路发生断流（溶剂泵故障）后，共去污工序残液中铀和钚的浓度缓慢升高。

安全性用户要求 UR1.2：INS 装置应能探测并且中止对正常运行状态的偏差，以防止预期的运行事件升级为事故工况。

应该优先考虑先进的控制系统，改善系统的可靠性，降低对昂贵设备的冗余性和多样性要求的需要。非能动和能动系统的优化将是重要的。在较长时期内，应该优先考虑针对特定设计的内在限制特性（有时称“自我控制性”），以及耐用、简单的（可能是非能动的）控制和先进的监测系统。

就核电厂而言，需要对装置的动力学问题进行分析，以阐明如何探测和缓解那些由于偏离正常运行引起的各种事件。装置模型应能够模拟控制系统和反应堆保护系统的变量、事故保护停堆参数，以及安全和辅助系统运行行为。就燃料循环设施（FCF）而言，建议进行类似的活动，并考虑到反应堆和燃料循环设施间的差别。

理想的情况是迅速返回正常运行，无需检查或监管事件报告。

安全性用户要求 UR1.3：应降低事故的发生频率，使之与总安全目标相一致。如果发生事故，专设安全设施应该能够将 INS 装置恢复到受控状态，并在随后达到安全的关闭状态，还要确保放射性物质的包封。对人为干预的依赖应该是最低限度的，并且只是在一定的宽限期以后才需要。

作为轻水反应堆的预期事故发生频率的一个实例，小破口失水事故的可接受限度可以低于 10^{-2}/堆·年。大破口失水事故可低于 10^{-4}/堆·年。

UR1.3 中使用的术语“受控状态”是指专设安全设施能够补偿由事故造成的功能性丧失的情况。应使用能动和非能动专设安全设施的优化组合。就 INS 而言，非能动设计特性也许能够实现几乎所有的基本安全功能。就核反应堆而言，这些特点可包括：非能动停堆、非能动衰变热排出系统和非能动运行的冷却剂注入系统。

“直到需要人为干预时为止的宽限期”指标与异常运行控制所采用的概念相同。在这里它意味着自动或非能动安全系统提供的宽限期。

加强的“专设安全设施的可靠性”可以用非能动设计来实现，尽管其他方法也可能是有效的。

“能发挥功能的屏障数目”和相应可接受限度“至少为 1”的指标意味着，专设安全设施的设计应确定性地在任何设计事故发生后，至少保证 1 个屏障（屏蔽放射性物质）的连续完整性。反之，可以用丧失所有屏障的可能性作为指标。

“次临界裕量”指标适用于（事故发生后的）核反应堆（停堆深度）和燃料循环设施，可解释为防止易裂变材料的积累或临界几何条件的发生。

安全性用户要求 UR1.4：应降低由内部事件引发的放射性向 INS 的安全壳/包封设施大量释放的频率。如果发生释放，应缓解其后果。

就创新型核反应堆和燃料循环装置而言，应加强系统在控制复杂事故序列方面的可靠性，包括测量控制与诊断系统的可靠性。这样，会降低放射性向安全壳大量释放的频率。

向安全壳内的释放可以用（例如）喷淋系统等手段加以控制或缓解，从而降低发生向安全壳外大量释放的可能性。

装置内部严重事故的管理措施是给操纵员提供一些手段来防止向安全壳/包封设施内的进一步释放，和/或降低那里已有的放射性核素浓度。

安全性用户要求 UR1.5：应当对一切实践目的防止放射性从 INS 装置中发生重大泄漏，从而除了出于类似目的为任何工业设施制订的一般应急措施外，INS 装置将不需要在场区外采取搬迁或疏散措施。

这项要求提出的问题是，如果核能在将来发挥重大作用，就一定要建更多的核电厂，而且场址必须是容易选择的。一些国家运气好，有许多偏远的大场地，但还有许多国家没有。因此，创新型核反应堆的安全性不应过多依赖于与居民的

距离。

创新型反应堆和燃料循环装置的专设安全设施应该能够控制严重事故（超出设计基准的事故）情景，并缓解它们的后果，以预防安全壳发生故障。控制和缓解措施应能处理所有威胁（内部的和外部的）。

因此，创新设计应表明：

- 大量释放的可能性非常小，以致于场区外的应急措施不会使风险[17]有明显降低，尽管也会降低释放的后果；或
- 就所有实践目的而言，可通过设计，即通过利用内在安全特性等手段，将大量释放排除在外。

因此，就 INS 而言，不必为其制订在类型上不同于出于类似目的为任何工业设施而制订的场区外应急计划。

安全性用户要求 UR1.6：*应该完成对 INS 的评估，以证明纵深防御的不同层次已被采用且其彼此独立性要强于现有系统。*

应该用确定论和概率论方法的适当结合或危险分析方法完成安全评估。关于评估方法的进一步要求将在基本原则 BP4 中简要说明。

安全性用户要求 UR1.7：*INS 装置的安全运行应该得到一套把人因要求系统地用于设计、建造、运行和退役的经改进的人机接口的支持。*

INS 的设计者应该更强调人为因素，以便把人为（操纵员的或维护人员的）失误的可能性降到最低限度。在设计过程中，应该考虑从核装置运行中获得的经验，以及航空业和化工厂等其他行业的最好实践。预期对正常和异常状况的人为响应的预测能力在今后 50 年必定大大改善，并且必定对装置设计与运行产生很大的影响。模拟器技术也很可能得到改善，使其能更逼真地模拟事件，包括严重事故，并将（通过培训）提高操纵员的响应能力——对照航空业现状。

[17] 定义为计算频率乘以该情景的潜在后果。

表 5.3. 与安全性基本原则 2（BP2）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">安全性基本原则 2（BP2）：INS 装置应酌情在其设计中更多地强调作为其基本安全方法的一部分的内在安全特性和非能动系统，并在安全性和可靠性上超过现有的装置。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求（UR）</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR2.1 INS 应适当地通过纳入内在安全特性和/或非能动系统，力争排除现有装置中的某些危险或将其降到最低限度。</td><td>2.1.1.典型指标：
贮存的能量、可燃性、临界性、放射性物质存量、可利用的过剩反应性、反应性反馈。
2.1.2.预期的异常运行和事故频率。
2.1.3.异常运行和事故的后果。
2.1.4.对创新型组成部分和方法的信心。</td><td>2.1.1.超过现有设计。
2.1.2.频率低于现有设施。
2.1.3.后果比现有设施小。
2.1.4.有效性的确定。</td></tr>
</table>

下面简要介绍安全基本原则 2 及其用户要求和准则。

安全性基本原则 2（BP2）：INS 装置应酌情在其设计中更多地强调作为其基本安全方法的一部分的内在安全特性和非能动系统，并在安全性和可靠性上超过现有的装置。

安全性基本原则 2（BP2）注重于内在安全特性和非能动安全特性在未来核设计中的作用。内在安全性特征的含意在前面（第 5.2.3 小节）解释过。如果将内在安全特性正确地纳入设计中，那么引发危险的因素会被排除。非能动系统能够提供额外的安全裕量；在这些情况下，像能动部件的单一故障准则之类的确定论设计要求可能不是必要的（由于安全性将不太依赖能动部件），假如为非能动系统开发出了可靠性模型的话。不过，应分析由于设计或维护中的人为失误、意外现象的出现、潜在的不利的系统相互作用而引发的非能动系统故障，并且可能需要用其他的设计措施加以补偿。

安全性用户要求 UR2.1：INS 应适当地通过纳入内在安全特性和/或非能动

系统，力争排除现有装置中的某些危险或将其降到最低限度。

对内在安全性特征进行分析虽有一定困难，但只要有适当的数学模型，在某些情况下，还需要实验测试，这项工作还是可以开展的。预计动力堆的大多数内在安全特性都是不全面的——也就是说，它们能限制危险，但不能排除危险。

这项用户要求规定的是一种程度：在核电反应堆类型或功率范围方面可能存在一些基本限制，这些限制将使绝对的内在安全性特征不能得到实现，例如，为了补偿氙毒，许多核电反应堆需要有充足的正反应性可供使用。

可接受限度的验证通过确定论和概率论安全分析来完成。

表 5.4. 与安全性基本原则 3（BP3）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">安全性基本原则 3（BP3）：INS 装置应确保在建造/调试、运行和退役期间给工作人员、公众和环境造成的辐射照射风险与用于类似目的的其他行业设施造成的风险相当。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求（UR）</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR3.1 INS 装置应该通过利用从现有设计的自动化、远程维护和运行中获得的经验，确保辐射防护优化概念的有效应用。</td><td>3.1.1.职业剂量值。</td><td>3.1.1.低于国家法律或国际标准确定的限值，从而保证工作人员的健康危害与用于类似目的的工业设施相当。</td></tr>
<tr><td>UR3.2 INS 的个别装置在正常运行期间给公众个人造成的剂量应体现出优化概念的有效应用，而且由于选址方面灵活性的增加，该剂量可降低到现有设施水平以下。</td><td>3.2.1.公众剂量值。</td><td>3.1.1.低于国家法律或国际标准确定的限值，从而保证对公众的健康危害与用于类似目的的行业相当。</td></tr>
</table>

安全性基本原则 3（BP3）：INS 装置应确保在建造/调试、运行和退役期间给工作人员、公众和环境造成的辐射照射风险与用于类似目的的其他行业设施造成的风险相当。

这项基本原则体现两个概念：

- 以寿期为基础。这项原则要求对在核设施寿期内（即建造、调试、运行和退役期间）给核设施内部和外部人员造成的辐射照射进行优化。

- 以风险为基础。也就是说，用于判断 INS（风险）的适当指标值是来自用于类似目的的其他行业的风险。

请注意，这项基本原则不适用于事故。对事故来说，优化不是有效的手段。在事故期间避免公众承受过度辐射剂量的要求，将通过用户要求 UR1.5 来实现，UR1.5 规定应该不需要采取疏散措施。

安全性用户要求 UR3.1：INS 装置应该通过利用从现有设计的自动化、远程维护和运行中获得的经验，确保辐射防护优化概念的有效应用。

就正常运行而言，这项用户要求重复了国际上接受的核能工作人员剂量优化原则。不过，来自现役设施的剂量已经是低的，因此要求进一步额外降低剂量并没有超出该优化原则的范围。根据现有反应堆方面的经验，在役检查、定期试验和修理（包括更换）是职业剂量的最主要来源。这项用户要求所预期的是，作为如自动化检查和维护等方面的一个零成本副效益，INS 能够利用创新型设计概念实现职业剂量的降低。创新型设计应该便于维护，实现维护的方法是：精心的规划布局、可靠的设备以及维护人员能从采用电子显示的工作面上获得有关维护程序的指导。

安全性用户要求 UR3.2：INS 的个别装置在正常运行期间给公众个人造成的剂量，应该体现出优化概念的有效应用，而且由于选址方面灵活性的增加，该剂量可降低到现有设施的水平以下。

这项用户要求虽然将同样的一些原则应用到公众剂量的优化上，但不要求额外的降低。鉴于目前这一代装置在正常运行中发生辐射照射的风险（与其他行业相比）是很低的，因此在创新型装置中不需要大的改变。不过，它提到，在 INS 离人口稠密区很近的地方（例如地区供热装置），可能需要与其他行业采取的作法一样，通过废物流的再循环等措施进一步降低剂量。

就这些用户要求而言，在对规模相差悬殊的 INS 进行比较时，一个比剂量更准确的指标是“人•希/单位能量”。此外，一些 INS 的概念要求将若干机组或不同的设施建在一个大型场区内。对于这种情景，可能要求每台机组或每个设备的剂量低于现有设施，以确保来自整个场区的剂量是可以接受的。

表 5.5 列出了需要在 INS 的商业推广前完成的与 RD&D 相关的用户要求。

表 5.5. 与安全性基本原则 4（BP4）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">安全性基本原则 4（BP4）：开展相关的研究、开发与验证（RD&D）工作，以便把对装置特性的认识以及用于设计与安全评估的分析方法的能力至少提高到与现有装置相同的置信水平上。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求（UR）</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR4.1 应在商业推广之前明确 INS 装置的安全基准。</td><td>4.1.1.确定安全概念。
4.1.2.明确说明与设计相关的安全要求。
4.1.3.明确处理安全问题的程序。</td><td>已确定。</td></tr>
<tr><td>UR4.2 应完成有关部件和系统（包括非能动系统和内在安全特性）可靠性的 RD&D 工作，以便实现支持安全评估所需要的对所有相关物理和工程现象的深刻认识。</td><td>4.2.1. 确定和完成 RD&D，开发数据库
4.2.2.开发和验证计算机程序和分析方法。
4.2.3.了解规模效应，和/或完成全规模试验。</td><td>已完成。</td></tr>
<tr><td>UR4.3 应建成反应堆和/或燃料循环工艺的小规模中试装置或大规模示范装置，这些装置应与现有运行经验有很大差别。</td><td>4.3.1.工艺的新颖程度。
4.3.2.中试装置的适当程度。</td><td>4.3.1a.高新颖度：把装置的确定，建造、运行和获得的经验纳入文件。
4.3.1b.低新颖度。规定绕开中试装置的理由。
4.3.2. 结果可充分外推。</td></tr>
</table>

续表 5.5. 与安全性基本原则 4（BP4）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">安全性基本原则 4（BP4）：开展相关的研究、开发与验证（RD&D）工作，以便把对装置特性的认识以及用于设计与安全评估的分析方法的能力至少提高到与现有装置相同的置信水平上。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求（UR）</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR4.4 就安全分析而言，在可行的情况下，确定论和概率论方法都应使用，以确保安全评估得到全面和充分的实施。随着技术逐渐成熟，一些“最佳估计（加不确定度分析）”方法将有助于确定实际危险，尤其对限制严重事故来说。</td><td>4.4.1.采用一种风险指引方法。
4.4.2.确定不确定度和敏感度并适当地进行处理。</td><td>已完成。</td></tr>
</table>

第 3 章“评估方法”介绍了使用新工艺技术的总体方法。

下面介绍了基本原则以及相应的用户要求和准则。

安全性基本原则 4（BP4）：开展相关的研究、开发与验证（RD&D）工作，以便把对装置特性的认识以及用于设计与安全评估的分析法的能力至少提高到与现有装置相同的置信水平上。

RD&D 的依据

为使对装置特性的认识，以及用计算机程序模拟创新型核反应堆和燃料循环装置的现象和系统行为的能力至少达到与现有装置相同的置信水平，将需要开展更多的研究工作（亦请参阅第 4 章“经济性”和第 3 章“评估方法”，它们探讨了关于开发周期的问题）。最近召开的有关“先进核反应堆安全问题和研究需要”的 OECD/NEA 工作会议[5-14]对下一代反应堆的规划与设计特别感兴趣。

为开发事故分析所需的计算机程序，需要对相关的现象、组成部分和系统有充分的了解。因此，装置与现有设计差别越大，越需要开展更多的 RD&D 工作。RD&D 将为了解威胁纵深防御结构的屏障完整性的事件提供基础，并能够减少设计、运行范围以及事故频率和后果估计中的不确定性裕度。

RD&D 与开发安全程序/分析方法的整合

随着 INS 开发工作的进行，将开展 RD&D 工作，以便确定那些对装置安全性和运行来说重要的现象，并对这些现象进行了解和验证。在开发过程的任何给定阶段（第 3 章“评估方法”的表 3.1 和表 3.2），要将最新的认识纳入到形成设计和安全评估基础的模型中。然后，这些评估被用作确定重要变量和估计安全裕量的敏感性分析（使用确定论和概率论方法）的工具。“现象确认和分类表（PIRT 评估）”也可用于发现和确定关键现象的重要性。这些分析用于找出安全重要系统间的耦合效应和相互作用。通常，尤其是在开发的早期阶段会得到一些无法预料的结果。这些结果，无论是预料到的还是未料到的，都将用于指导 RD&D 计划，以便（例如）提高概念上的认识、取得更准确的数据、确定系统相互作用/相互依赖的程度，以及对设计进行表征。这些 RD&D 工作会增加认识，并改善设计与安全分析中所用分析手段。这是一个迭代过程。在开发的初步概念阶段，物理认识、分析模型、支持性的数据库和程序可能会过分简单并且存在很大的不确定性；但是，随着开发的进行，认识将不断提高，（概念认识和数据中的）不确定性将不断减小，分析模型和程序的确认也将得到改善。在商业化过程中，需要确定并了解所有安全相关现象和系统相互作用，用于安全分析的相关程序和模型需要进行充分的鉴定和验证，安全分析则要证明装置设计是安全的。

下面将更详细地介绍与技术可靠性有关（和表 5.5 所示）的用户要求。下面的第 5.4 节探讨了已经能预计到的那些 RD&D 领域。

安全性用户要求 UR4.1：应在商业推广前明确 INS 装置的安全基准。

“安全基准”一词是指装置在建造和运行前形成的有关其设计的安全要求和安全评估的文件。安全基准包括一个为实现安全需要明确定义的概念，即以可监查的合理过程确定并用文件证明装置的所有设计和安全要求。设计、RD&D 以及安全分析间的迭代是该过程的必要部分。各项要求一旦确定，就必须验证并用文件证明它们已得到满足。

安全性用户要求 UR4.2：应完成有关部件和系统（包括非能动系统和内在安全设施）可靠性的 RD&D 工作，以便实现支持安全评估所需要的对所有相关物理和工程现象的深刻认识。

一般的作法是，在程序计算、运行经验和广泛认可的工程实践的基础上评估系统或部件的性能。创新型设计的开发，可以使用新的堆芯材料、在新的热工水力工况下使用流体并采用完全不同的燃料和冷却剂；同时应该开发用以模拟这些设计的计算机程序。这些计算机程序，应该利用国际标准中规定的最新技术（验证成套方法、不确定性量化、可缩比性证明、自动核对工具、程序鉴定报告等），

在其应用范围内正式校核和确认[18]，并得到充分的描述（软件要求说明书、理论手册、用户手册、流程图等）。

通过使用安全裕量将不确定性考虑进来。就创新型装置而言，运行经验是有限的或者是零。计算机程序和分析方法需要以那些已对照实验数据确认过的模型为基础，但在早期开发阶段，对模型的依赖程度会低于现有设计。除模型确认外，计算也必须对照系统响应试验结果加以确认。当这类试验在小规模装置中进行时，需要采用适当的放大法。

至少，应满足下列要求：

- 必须了解、建模和模拟核电厂装置或燃料循环装置设计和运行涉及的所有对安全有影响的不可忽视的现象（这包括有关不确定性的知识，以及放大和环境影响）。
- 安全相关系统或部件的性能，必须以可接受的准确度进行模拟。这种模拟包括了解所有安全相关参数和现象，并对照可靠的数据库加以确认。

安全性用户要求 UR4.3：*应建成反应堆和/或燃料循环工艺的小规模中试装置或大规模示范装置，这些装置应与现有运行经验有很大差别。*

新技术的验证，一般是从工作台架实验到小规模工业试验，到大规模试验，（可能）到小型中试装置，到大规模示范装置，再到完全商业化。是否需要中间装置或示范装置，将取决于工艺过程的新颖程度以及对业主与公众造成的潜在风险的大小。

应该认识到，小型中试装置只能用来验证对应于纵深防御的层次 1 和层次 2 的偶然事件（异常运行和故障）的适当的安全特性。INS 在（有可能释放放射性的）事故中的安全性能，必须如上述用户要求 UR4.2 所规定的那样，使用一些对照（例如）经整合的多重效应试验的结果确认过的程序或分析方法来加以论证，而不可能在中试装置中加以研究。这些方法涵盖在用户要求 UR4.4 中。不过，一些中试装置应该能够证明 INS 应对潜在事故诱因的能力。

重要的是，中试装置要有适当的规模，以便能够以适当的准确度将中试装置的结果和经验外推到全规模装置。例如，要建造一座年处理 100 吨乏燃料的后处理厂，适当的作法也许是建一座年处理能力为 1—10 吨乏燃料的中试装置，而不是建一个只用来处理几公斤的装置。

安全性用户要求 UR4.4：*就安全分析而言，在可行的情况下，确定论和概率*

[18] 校核是将程序计算结果与实验结果相比较，目的是验证计算结果的准确性（偏差）和不确定性。确认是证明所选择的那些物理模型已被正确地纳入到程序中，而且内部程序的逻辑解和数值解是正确的。

论方法都应使用，以确保安全评估得到全面和充分的实施。随着技术逐渐成熟，一些“最佳估计（加不确定度分析)”方法将有助于确定实际危险，尤其对限制严重事故来说。

安全分析应适当综合使用确定论评估与概率论评估[19]的方法。安全分析应该涵盖装置的所有运行模式，以便对遵守纵深防御概念的程度做出全面的评估。对于简单装置，主要是与燃料循环相关的简单装置，可能只需要完成确定论分析，只要选定一些适当的情景来验证纵深防御的所有层次的保护能力。

每种方法的使用程度应在可靠性数据、故障模式和物理现象方面与具体应用方法的可靠程度相一致。在某些创新型系统中，由于技术上的改变且因此能获得的数据有限，因此与现有反应堆类型采用的那些方法相比，概率论方法的使用可能更受限制。

确定论安全分析的保守程度应与所评价技术中的不确定性相一致；当充分了解了现象和确认了程序时，在分析中可考虑实际假设（最佳估计）。最佳估计分析完成后，应计算那些对结果有影响的实验、模型和装置的不确定度。如果工艺技术本身是不确定的，应该采用更传统的方法，例如当预期在反应堆中使用与现在不同的液态金属，而现有的程序又尚未开发到足以模拟所有现象的程度时。在这些工具可供使用并确保足够准确之前，在序列模拟中应采用安全裕量和保守性。

除评估装置对严重事故和大量释放的脆弱性外，应该从设计阶段开始使用概率论安全分析，以便：

- 为缓解系统（包括安全壳）确定更现实的负荷和条件；
- 评估设计与可能的弱点之间的平衡；
- 将人因工程纳入安全分析中；
- 确定安全裕量；
- 帮助确定运行安全要求；以及
- 确定敏感度和不确定度。

[19] 确定论安全分析使用预先确定的一套事故来界定安全系统的设计。一般使用有关事故引发和演化、装置状态和装置响应的保守假设；往往使用在其物理模型中带有已知保守性的计算机程序。安全分析在这 4 个领域也可以用实际假设来做，因此被称为“最佳估计”分析。通常最佳估计分析是与结果中的不确定性计算相结合的，于是产生“最佳估计+不确定度分析”（BE+UA）。概率论安全分析将所有事故的频率和后果计算到很低的概率水平，以便确定来自装置的风险，帮助优化设计，帮助管理事故等。最佳估计分析一般用来计算概率论安全分析中的事件序列后果，因为希望获得现实的答案（以便不曲解风险）；估计被预测装置的性能在保守的确定论安全分析与“现实”之间的差别。

5.3.4. 燃料循环设施的特殊性

就反应堆而言，预防放射性物质的事故性向外大量释放是人们所最关心的，然而就燃料循环战略而言，减少废物的日常排放以及废物的影响（例如通过在设施内再循环适当处理后的低放射性液体废物而不是通过向环境排放）是相对更重要的。核燃料循环只有几个环节（例如，后处理工厂的高放液体废物贮存设施和大量钚的库存设施）具有不可忽视的风险。因此，对创新型燃料循环的要求不仅应解决设施的安全性问题，还应解决长期的放射后果问题，同时要了解在减少这些设施的排放方面取得的重大进展[5-15，5-16]。

剂量分配取决于所论 INS 场址。一个场地上的设施的数目和种类应该与该场地未来利用的设想相一致。

创新型燃料循环的采矿、水冶、转化和富集活动不得给工作人员、公众和环境带来不当的额外风险。钍和铀的更好利用意味着，与单位能量生产相对应的采矿和水冶活动将有所减少，这将减小工作人员和公众所面临的绝对健康风险。实际上，能够减少采矿活动和水冶活动，或能够减少待处理的燃料的数量的任何方案都属于创新方案。它不仅将减少风险因素，而且将减少公众所受照射，以及减小燃料循环活动对环境的影响。因此，那些将使燃料达到更高燃耗水平的燃料材料选择、燃料设计和运行方式中的改进，都应满足上述创新要求，因为生产单位能量所需处理（从水冶到后处理）的燃料的数量将减小。第 7 章“废物管理”也对这方面进行了介绍。

燃料类型的选择应高度注重燃料循环所有环节（包括但不限于反应堆）的安全性。对所选定的燃料的具体安全要求，将取决于创新型反应堆和燃料循环装置概念。燃料类型的选择将影响到，从采矿到废物处置的整个燃料循环的所有环节在正常运行和事故工况下的安全。虽然为创新反应堆采用的一些先进燃料可能超过现有水堆的堆芯性能，它们的理化特点在安全性方面可能不如现有的水堆燃料，需要采用补偿性设计或补偿性运行程序。应该对整个燃料循环（包括反应堆）的每个环节进行燃料类型的安全评估，重视（并补偿或缓解）安全性较弱的所有环节。

先进燃料制造的安全水平应和常规水堆燃料制造的安全水平相近。不过，创新型反应堆的先进燃料将需要其他的制造方法，例如振动填实、铸造、包敷颗粒和熔盐技术。临界控制应该使用成熟的方法。另外，供燃料制造用的来自后处理的原材料中将含某些锕系元素和长寿命裂变产物。放射性活度更高和释热能力更强的先进燃料可能给燃料制造带来技术挑战。燃料制造装置应该更多地利用先进测量仪器以及对物料量及其组成进行自动监测的设备，并且利用得到的信息驱动基于人工智能的控制系统——以抵消先进燃料更高的放射毒性。

在创新型燃料的开发中，除废物管理要求（见第 7 章“废物管理”）外，还应从一开始就必须重视在中间贮存设施中正确和安全地处理燃料。乏燃料应在适当的监测下进行搬运和贮存，并及时鉴定燃料的特性。预期的更高燃耗水平将导致乏燃料中钚和其他超铀元素浓度和衰变热增加。除排热系统外，还应对燃料搬运设备和乏燃料贮存水池的屏蔽进行相应调整。乏燃料贮存不应有系统性的燃料破损和放射性物质释放。除设施本身外，还应对贮存中的燃料和贮存容器进行监测，以证实其完整性。

先进的后处理/再循环的安全性应至少与常规水堆 UO_2 后处理和用于热反应堆的 U/Pu 再循环安全性相近。在这方面，认识到，有关 $Th/^{233}U$ 后处理安全的一些问题将比与常规 U/Pu 再循环活动有关的一些问题更具挑战性。后处理和再循环的安全问题包括临界、屏蔽、火灾和爆炸，以及控制和监测。

创新型燃料循环材料的运输应考虑屏蔽、发热量的增加、分散、临界、偷盗等问题。正如为某些闭合燃料循环概念所设想的那样，如果大多数或全部燃料循环活动在同一个场区内进行，运输风险就会降低。

为创新型反应堆和燃料循环装置制订的退役战略应该包括，用于将公众和工作人员所受辐射照射降到最低限度的技术和行政措施。理想地说，在装置建造时就应该有退役计划。至少在核电厂的初步设计阶段就应制订一份粗略的退役计划。这份计划将在运行期间进行修改，以利于在运行结束和退役开始之前制订最后的退役计划。

5.4. 安全 RD&D 的领域

可能预期有以下 RD&D 领域：

目前预计使用的先进核电厂设计，除轻水或重水（直到超临界状态）外，还将使用*液态金属或气体作为工质*。必须用试验方法测定这些工质在正常运行和事故工况下的性质。需要开展进一步工作以便更好地了解自然循环现象，例如启动、稳定性问题等，尤其是与两相流和超临界流体相关的问题。

*中子-热工水力相互作用*将是需要做进一步研究的另一个重要方面。这主要是对超临界水和可能发生耦合的中子和热工水力振荡[20]的过冷两相流等流体状态而言。

*创新型燃料设计*将需要测试燃料性能，包括尺寸和机械稳定性、燃料元件和冷却剂间的可能的化学相互作用，以及燃料材料和燃料元件包壳间的机械-化学的相互作用。

[20] 例如用超临界水冷却的反应堆和沸水堆。

INS 可能包括对次锕系元素和长寿命裂变产物进行嬗变的加速器驱动系统（ADS）。要求把 RD&D 工作的未决问题范围从质子/中子物理（数据库）扩大到液态金属冷却系统的热工水力学。一个类似的重要课题是，使用惰性燃料基体实现锕系元素在热反应堆中的焚烧。

后处理有一系列的化学反应，例如溶剂萃取、氧化/还原、电解提纯、离子交换等。在过程控制、溶剂化学和干处理（氧化/还原反应）等诸多领域需要开展广泛的 RD&D 工作。此外，还应该开发用于量化这些设施的安全性的方法。

预计数字化仪表控制（I&C）系统将广泛用于能动控制。此外，预期还会开发出一些“更智能的”仪表控制系统，这些系统将与提供当前装置状态、运行限值（技术的详细要求）、设计与概率论安全分析（PSA）模型的数据库连接，并可利用人工智能来控制装置，以及诊断和缓解事故。场区外联系也有助于装置的监测和问题的解决。

需要进一步开发概率论安全分析（PSA）方法（包括最佳估计加不确定度分析）及其支持性数据库，并需要能够：

- 评估使用内在安全特性和非能动以及能动系统的创新型核设计；
- 评估来自各种（满功率、低功率和关闭）状态的总体风险，并考虑内部的和大多数外部的始发事件；
- 考虑安全文化和人为因素；
- 考虑老化效应；以及
- 量化随机效应以及数据和模拟的不确定度。

最后，对先进反应堆实施纵深防御（DID）可能需要一种基于对纵深防御的更进一步说明并充分纳入了概率论安全分析成果的新方法。到现在为止，纵深防御一直是主要通过基于预防和/或缓解的确定论分析实现的。预期风险指引决策将在未来反应堆和燃料循环设施的开发中发挥重要作用[5-17]。这将有助于在降低成本的同时实现高水平的安全性，尤其是通过安全系统的简化和对安全系统和部件进行合理且均衡的安全分类。未来的挑战是，开发置信度更高的概率论安全分析手段，实现确定论分析和概率分析的适当结合，以及证明足够的纵深防御能够通过更简单的和更便宜的技术解决方案来实现。

总之，在创新型反应堆和燃料循环装置方面需要开展诸多 RD&D 工作，以便：

- 确认所有重要的现象；

- 校核有关新的流体和固体材料性能的程序；
- 证明放大成商业规模装置的正确性；
- 补偿运行经验的不足；
- 在适当规模（例如中试装置规模）的装置中验证工艺技术；
- 获得可靠性数据；以及
- 开发用于风险指引决策的工具。

5.5. 结语

就创新型核反应堆和燃料循环装置的安全性而言，已经正式提出 4 项基本原则和 14 项用户要求。安全方案的基础是应用了一种经加强的纵深防御战略，并更加重视内在安全特性和非能动特性。纵深防御不同层次间的更大独立性，被认为是避免故障从一个层次向另一个层次传播的关键要素。核装置中保护环境和人所需要的物理屏障的数目取决于潜在的内、外部危害和故障的潜在后果。因此，屏障的层数和强度，将随核反应堆的类型（例如高功率堆芯或很低功率堆芯的反应堆）或燃料循环装置的类型而变化。

经加强的纵深防御战略的目标是，即使在严重事故下，也将不需要疏散装置附近的居民，只须采取与任何工业装置一样的一般性应急措施。

应认识到，就创新型核反应堆和燃料循环而言，为确保能在给定概念下考虑和优化来自所论系统的所有环节的放射性物质释放，需要更好地整合各种开发活动。从理论上说，应在创新型核反应堆和燃料循环装置的概念确定阶段评估整个反应堆和燃料循环（包括相关的废物处理装置）的影响（例如剂量）。应设法在风险、影响和经济性之间取得平衡，以便优化整体能源生产。

第 5 章参考文献

[5-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Design Requirements, Safety Standards Series No. NS-R-1, IAEA, Vienna (2000).

[5-2] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1 INSAG-12, INSAG Series No. 12, IAEA, Vienna (1999).

[5-3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Advanced Light Water Cooled Reactor Designs - 2004, IAEA-TECDOC-1391, Vienna (2004).

[5-4] OECD INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL NUCLEAR ENERGY AGENCY, Innovative Nuclear Reactor Development Opportunities for International Cooperation, OECD/IEA, Paris (2002).

[5-5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety of Nuclear Installations, Safety Series No. 110, IAEA, Vienna (1993).

[5-6] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Defence in Depth in Nuclear Safety INSAG -10, INSAG Series No. 10, IAEA, Vienna (1996).

[5-7] A. CARNINO, M. GASPARINI, "Defence in Depth and Development of Safety Requirements for Advanced Nuclear Reactors", Proceedings of an OECD/NEA Workshop on "Advanced Nuclear Safety Issues and Research Needs", Paris, 18-20 Feb. 2002.

[5-8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of and Regulations for Nuclear Fuel Cycle Facilities, IAEA-TECDOC-1221, Vienna (2001).

[5-9] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Safety Culture (A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group), INSAG Series No. 4, (Safety Series 75), IAEA, Vienna (1991).

[5-10] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Management of Operational Safety in Nuclear Power Plants INSAG-13, INSAG Series No. 13, IAEA, Vienna (1999).

[5-11] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Key practical Issues in Strengthening Safety Culture INSAG-15 (Including Booklet), INSAG Series No. 15, IAEA, Vienna (2002).

[5-12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants, Safety Guide Safety Series No. NS-G-1.2, IAEA, Vienna (2002).

[5-13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Accident Analysis for Nuclear Power Plants, Safety Reports Series No. 23, IAEA, Vienna (2002).

[5-14] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, INTENATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Proceedings of NEA/IAEA Workshop on Advanced Nuclear Reactor Safety Issues and Research Needs, Paris, 18-20 February 2002, OECD/NEA, Paris (2002).

[5-15] ALLAN, C.J., ALLSOP, P.J., ANDERSON, R.W., BOSS, C.R., and FROST, S.E., " Radioactive Releases in the Nuclear Fuel Cycle - Recent Experience and Improvements", Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategies: Adjusting to New Realities, Contributed Papers, IAEA-TECDOC-990, IAEA, Vienna (1997).

[5-16] A. STRUPCZEWSKI, "Comparative Assessments of Emissions from Energy Systems, Benefits & Burdens", IAEA Bulletin 41/1/1999, IAEA, Vienna, (1999).

[5-17] M. Gasparini, "IAEA Safety Standards and Approach to Safety of Advanced Reactors", 5th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids", Dubrovnik, Croatia, 16-20 May 2004.

第 6 章

环　境

6.1. 引言

6.1.1. INPRO 和环境

如前面第 2 章“INPRO 与可持续性概念”所述，可持续性的概念可以从社会、经济性、环境和制度等多种相关但不同的角度予以考虑。本章通过考虑与自然资源耗竭和环境退化相关的问题，论述可持续性的环境方面。

在很多国家审批工业活动的过程中，环境保护是一个重要的考虑方面。一些反映了国际共识的文件明确地指出了国际社会对环境的关注程度，特别是布伦特兰委员会报告[6-1]、里约热内卢可持续发展宣言[6-2]、IAEA 联合公约[6-3]、以及在第 2 章“INPRO 与可持续性概念”中讨论的其他文件。

当代人不得危及后代满足其自身需要的能力，而是应该留给后代一个健康的环境。核电能以其对大气、水和土地利用相对低的负担，提供大量能源支持可持续发展，因此进一步发展核电将有利于缓解其他能源生产方式（特别是燃烧化石燃料）造成的环境负担。

必须有效地预防或降低核燃料循环各环节可能对环境的不利影响，以使核能长期持续发展。高效率的有效利用各种资源也是必要的。此外，改进技术应包括改进技术的环境性能，使其达到与对社会的重要性相匹配的地步并与竞争技术的潜在环境性能相当。

INPRO 的目的是支持能够以可持续的方式满足 21 世纪全球能源需求的核技术的发展。具有可持续性的 INS 首先必须是安全的。INPRO 虽然有一些专门处理安全性问题（第 5 章，“核设施安全”）的专项任务，但是仅仅涉及了对人的放射影响和可能释放放射性物质的核事故的风险。环境方面的范围要广泛得多，包括对非人类环境的潜在影响和非放射性应激物的影响。此外，评估和控制环境效应使用的标准和方法与确定核安全使用的标准和方法通常是不同的。

为了恰当地评价一项技术的经济生存能力及其相对经济优势，必须考虑技术的一切成本，包括与保护人类健康和环境相关的成本。此外，还应将所谓的外部成本（由社会负担的、而没有由产生者负担的遗留健康和环境效应）也考虑在内。这些成本已在第 4 章“经济性”中说明。

国际放射防护委员会（ICRP）在过去的看法是“为保护人类达到当前认为需要的程度而采用的环境控制标准，将保证不致危及其他物种”[6-4]。对这一观点进行仔细研究目前已成为越来越迫切的要求，为此 ICRP 最近组织了环境效应任务组，以期提出一个评价电离辐射环境效应和保护环境免于其有害效应的框架。

INPRO 涉及的是可能要经过 50 年或更长的时间才能实施的创新型系统，但是需要强调，考虑环境效应的时间框架尽管难以确定，但是无疑要比考虑实施的时间框架长很多。

6.1.2. 目标

本章的目标有两个：

1. 规定和讨论 INS 环境性能的基本原则和用户要求；

2. 说明对所建议的 INS 进行环境性能评估的方法要求。

INS 环境性能的原则和要求在第 6.2 节和第 6.3 节中详细讨论，并概括于表 6.1 和表 6.2。在第 6.4 节中概述评估方法的要求。

6.1.3. 环境效应

术语“环境”在不同管辖区域的法律和条例内有所界定。一般包括如下部分：人类；非人类生物群；包括土壤、水体和空气，自然资源和景观的无生命部分；以及这些部分之间的相互作用。

图 6.1 说明了核能系统环境效应评估所涉及的因素，并特别指出了从源项到效应的因果链。

本节论及的环境效应包括：环境的物理、化学或生物学变化，对人、植物和动物的健康效应，对人、植物和动物的生活质量产生的效应，经济效应，资源的使用/耗尽，以及系统的影响与对环境的其他影响共同产生的累积效应。

一个 INS 可能有一些在其评估中必须加以考虑的环境负面效应。同时也必须认识到，这个 INS 将产生非常重要的环境利益（例如，核电被公认为是满足《京都议定书》和《联合国气候变化框架公约》所确定的全球排放目标的关键技术）。虽然在评价环境性能中强调的是负面效应及其最小化，但重要的是始终记住这些利益的存在。

放射的和非放射的两种效应在评估中都有重要意义。需要考虑来自系统不同组成部分和不同环境应激物的效应之间的协调和协同。就 INRPO 的目的而言，

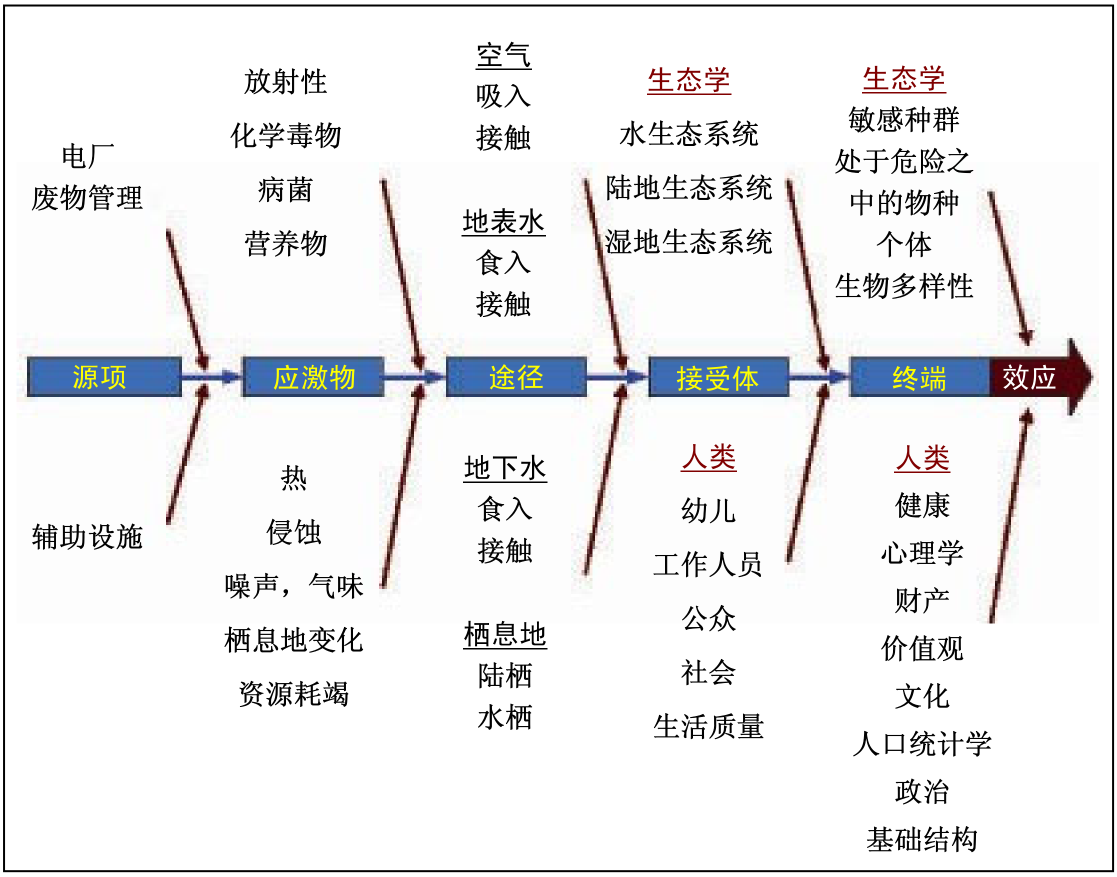


图 6.1. 环境评估所涉因素

优先考虑的是对于下述两点重要的那些效应：

- 判定核能系统是否遵守基本原则；以及
- 在作为 INPRO 总体技术评估的部分内容的技术的环境性能方面，对拟议的整个核能系统及其组成部分进行比较。

6.2. 环境基本原则

在环境领域已经确定下面两项基本原则：

基本原则 1（BP1）（预期的负面环境效应的可接受性）：

INS 的预期（最佳估计）负面环境效应应完全处在提供相似能源产品的现行核能系统的性能范围内。

基本原则 2（BP2）（目的的适当性）

INS 应能够在高效利用不可再生资源的条件下满足 21 世纪的能源需求。

6.3. 与基本原则相关的环境用户要求和准则

在下面的表 6.1 和 6.2 中，列出与上面确定的各项基本原则相应的用户要求和准则。

表 6.1. 与环境基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">环境基本原则 1（BP1）：（预期的负面环境效应的可接受性）
INS 的预期（最佳估计）负面环境效应应完全处在提供相似能源产品的现行核能系统的性能范围内。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR1.1 在整个寿期内，INS 各部分的环境应激物应可控制到符合或优于当前标准的水平。</td><td>1.1.1：$L_{St\text{-}i}$，
应激物 i 的水平。</td><td>1.1.1：$L_{St\text{-}i} \leqslant S_i$，
其中 S_i 是应激物 i 的标准。</td></tr>
<tr><td>UR1.2 INS 的可能的负面环境效应在考虑了社会的和经济的因素之后应当合理可行尽量低（ALARP）。</td><td>1.2.1：在限制环境效应方面，INS 是否考虑过适用 ALARP 吗？</td><td>1.2.1：是。</td></tr>
</table>

下面简要地讨论环境基本原则 1 及其用户要求和准则。

环境基本原则 1（BP1）：（预期的负面环境效应的可接受性）

INS 的预期（最佳估计）负面环境效应应完全处在提供相似能源产品的现行核能系统的性能范围内。

核能系统的任何组成部分及其寿期的任何阶段都可能产生负面环境效应，而且系统中某一组成部分的设计和运行可能对其他组成部分的环境效应产生较大影响。因此，应该将拟议系统的环境性能作为一个整体予以评价。

预期的负面环境效应不应超出当前的监管导则（即评估期间的通用监管导则），现有核能系统无疑能满足当前的监管导则要求。例如，可参阅欧盟 ExternE 研究报告[6-5]。该项研究调查了可供选择的能源生产系统所产生的效应，结果表

明现有核能生产所产生的环境效应相对较低。在某些情况下，使用预期将在系统投入应用时生效的标准可能是适当的。有一种预期是，INS 的环境性能将优于现有的系统。

对于一个 INS 而言，潜在环境效应的最直截了当的度量是来自 INS 的设施和工艺所产生的应激物。应激物包括放射性的和非放射性的化学排放物以及释放出的热量和机械能。应激物造成的实际影响随地理位置、以及其他的特定地点和特定方案等因素而明显不同。但是在其他条件都相同的情况下，应激水平（数量）越低，最终的环境效应也就越低。此外，与环境途径和接受体相比，应激物相对易于受设计者控制。因此，用于 INPRO 环境效应的首要度量是与 INS 相关的那套环境应激物。

图 6.2 有助于解释这项基本原则。无论是在 INS 还是选作比较的一个现有核系统（CNS）中，每一种应激物用一个矢量表示，矢量的长度与应激物水平成正比。沿矢量的圆的半径代表该应激物的标准。这样就可以表明每一种应激物与其标准的相对关系，所有的标准位于圆周上。本图中应激物的数目是任意定的，代表不同应激物的矢量的相对长度也没有特定意义。CNS 产生的应激物用蓝箭头表示，其大小表示为 $L_{CNS\text{-}i}$。绿箭头表示 INS 产生的应激物，其大小表示为 $L_{INS\text{-}i}$。INS 的每一种环境应激物必须在红色的圆周之内（即必须满足其标准）。现有系统可能完全也可能不完全在圆周之内，取决于现行标准是否与在 CNS 投入应用时生效的以前标准相同，如 $L_{CNS\text{-}4}$。如图所示，与 CNS 的应激物相比，某些 INS 的应激物可能低（例如 $L_{INS\text{-}2}$，$L_{INS\text{-}4}$，$L_{INS\text{-}5}$），而某些可能高（例如 $L_{INS\text{-}1}$），或者相同（例如 $L_{INS\text{-}6}$，$L_{INS\text{-}7}$）。某些 CNS 的应激物可能在 INS 中不会再产生（如 $L_{INS\text{-}3}$），而 INS 也可能产生新的应激物（如 $L_{INS\text{-}8}$）。蓝色和绿色面积的大小以及矢量的角度都不表示任何量，只是便于清楚表示。

当所有应激物都得到考虑时，INS 的性能范围（绿色）应在 CNS 性能范围（蓝色）之内。这不意味着所有 INS 的应激物的数量必定低于 CNS 的应激物，而是权衡地讲 INS 中任何一个应激物的增加将因为其他应激物的减少而得到补偿。倘若 INS 的一个或几个应激物与对应的 CNS 的应激物进行比较不利时，那么建议将多变量分析作为一种帮助确定 INS 与 CNS 这两者的环境性能范围之间的相对关系的工具。另外的一种方法是采用同一准则来表示所有应激物的水平，因此可将它们汇总到一个“指数”中。两种方法都需要进行主观判断，并都可用于对两个 INS 进行相互比较。

当应激物水平被作为 INS 之间的比较内容时，重要的一点是将应激物水平归一化到单位能源生产所产生的应激物。

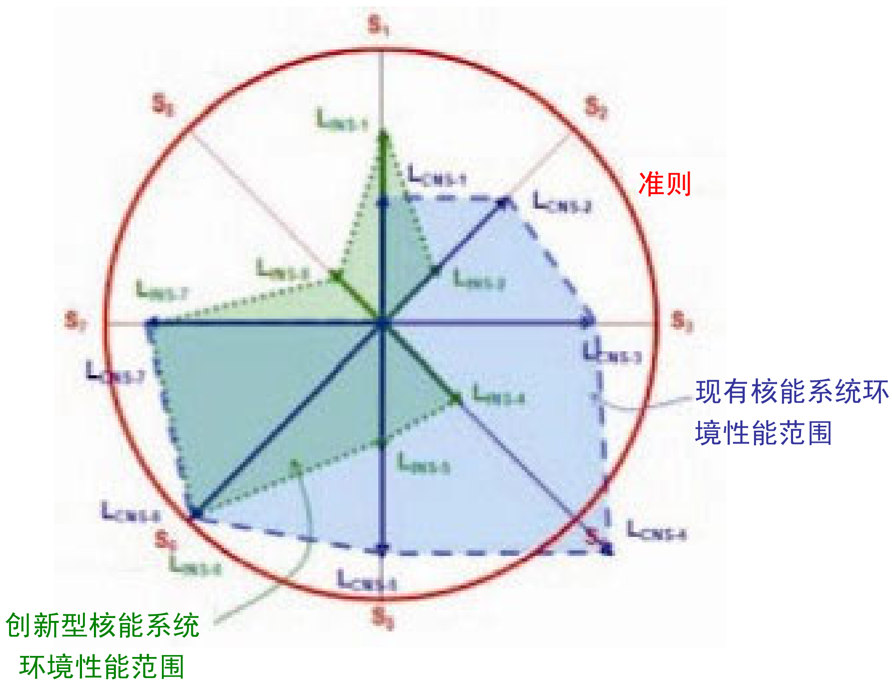


图 6.2. 环境性能范围

核能系统的环境性能分析不应用于与其他能源系统的比较，除非对两者的分析已经达到类似的深度。

推荐用于 INPRO 环境分析的整体方法示于图 6.3。在下面几节中介绍图中的不同部分和物流。

环境用户要求 UR1.1:（环境应激物的可控性）

在整个寿期内，INS 各部分的环境应激物应可控制到符合或优于当前标准的水平。

任何能源系统都不可避免地向环境排放如放射性核素或非放射性化学物等应激物并消耗资源，并对当地的、地区的甚至全球范围的环境造成潜在的负面效应。核设施和工艺的运营者将负责控制应激物。INS 的设计功能（即这类系统的设计准则）是提供贯串整个核能系统的对所有应激物的可控性。

所有的应激物应可控制到满足或优于当前的标准（在评价能源系统设计时候的通用标准）。每一项标准与今天的标准比较可能相同、放宽或更严格，这取决于对环境效应的科学理解状况以及利益相关者的认识。

环境用户要求 UR1.2:（合理可行尽量低的负面效应）

INS 的可能的负面环境效应在考虑了社会的和经济的因素之后应当合理可行尽量低。

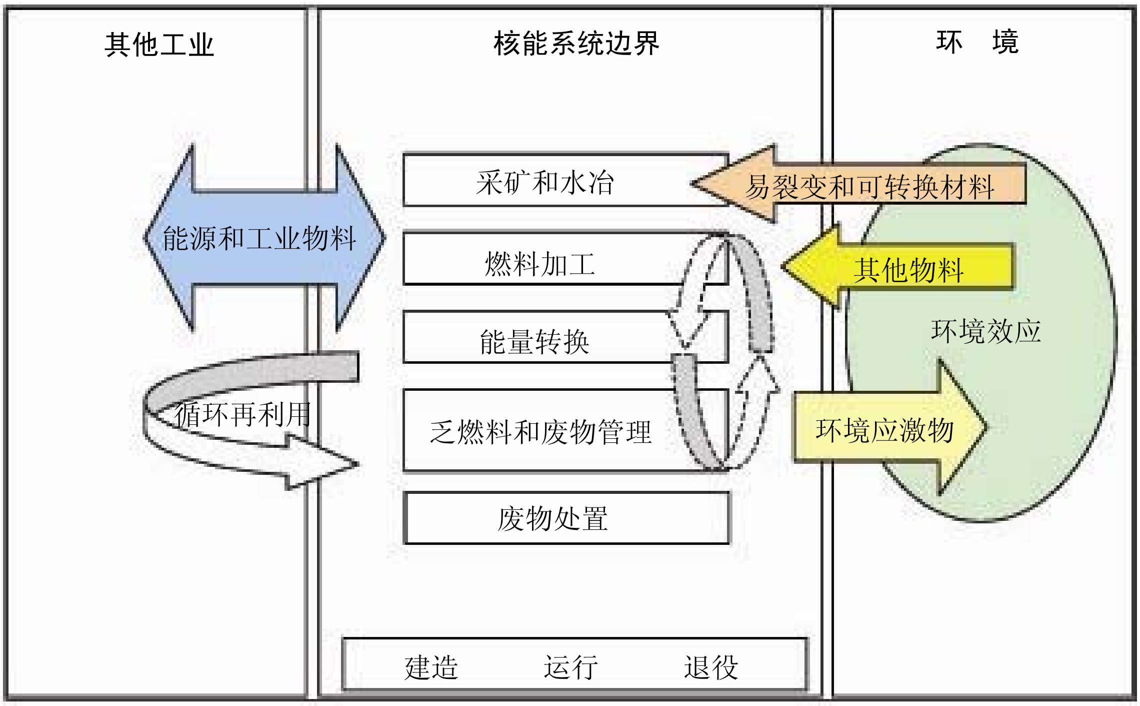


图 6.3. 整体方法

INS 应当遵守比现有核能系统更高的环境标准。但是应认识到在某些情况下，提高个别设施或工艺的环境性能可能会因能源系统中其他部分增加的负面效应而被抵消。因此，这一项用户要求（1）把合理可行地达到最佳性能的原则应用到整个 INS；（2）并把它扩展到所有负面环境效应，而不仅限于对人类的放射效应；（3）继续认识到提高环境性能所付出的代价与利益不应严重失衡。

提出这项要求的基本想法是核能系统应按现代工程原则加以设计。然后审查设计，以证实在考虑了社会的和经济的因素后其环境风险达到合理可行尽量低（ALARP）。ALARP 分析包括评价降低重要环境应激物水平的代价和利益两方面。这种评价将导致实施某种降低应激物水平的方法，或由于代价明显超过利益而拒绝这种降低。

在表 6.2 中给出了环境基本原则 2（BP2）及其用户要求和准则。

表 6.2. 与环境基本原则 2（BP2）相关的用户要求和准则

环境基本原则 2（BP2）：（目的的适当性） **INS 应能够在高效利用不可再生资源的条件下满足 21 世纪的能源需求。**		
用户要求	准 则	
	指 标	可接受限度
UR2.1（与可供使用资源的一致性） INS 应能够满足 21 世纪全球的能源需求，而不耗竭易裂变/可转换材料和其他不可再生材料，并考虑到这些材料在 INS 以外可合理预期的应用。同时 INS 应高效利用不可再生资源。	2.1.1 F_j（t）:在 t 时刻可获得的供 INS 使用的易裂变/可转换材料 j 的量。	2.1.1 F_j（t）＞0 ∀t＜100 年[21]。
	2.1.2 Qi（t）：在 t 时刻可获得的供 INS 使用的 i 材料的量。	2.1.2 Qi（t）＞0 ∀t＜100 年。
	2.1.3 P（t）：在 t 时刻从内部源和外部源可获得的供 INS 使用的动力。	2.1.3 P（t）≥P_{INS}（t）∀t＜100 年。 其中 P_{INS}(t)为 t 时刻 INS 需要的动力。
	2.1.4 U：INS 消耗 1t 开采的铀提供终端使用的（净）能量。	2.1.4 U＞U0 U0：采用一次通过式燃料循环的压水堆可达到的最大 U。
	2.1.5 T：INS 消耗 1t 开采的钍提供终端使用的（净）能量。	2.1.5 T＞T0 T0：现在运行的钍循环可达到的最大 T。
	2.1.6 Ci：消耗 1t 限定的不可再生资源提供终端使用的（净）能量。	2.1.6 Ci＞C0 C0：根据特定情况确定。
UR2.2（足够的净能量产出） INS 的产出能量应在可接受的短期内超过实现和运行 INS 所需的能量。	2.2.1 T_{EQ}：使产出能量与输入能量相等所需要的时间（年）。	2.2.1 T_{EQ}≤k•T_L T_L：预计的 INS 寿期 k＜1

[21] “F_j（t）＞0 ∀t＜100 a”表示在 t 小于 100 年的任何时刻 F_j（t）必须大于 0。

下面概述基本原则 2 及其相应的用户要求和准则。

环境基本原则 2（BP2）：（目的的适当性）

INS 应能够在高效利用不可再生资源的条件下满足 21 世纪的能源需求。

为了在环境方面是可接受的，系统必须是可持续的, 在预期的全寿期内不能中途耗竭重要的资源。这些资源包括易裂变/可转换材料、水（当供应受到限制或迫于水质）和其他重要材料。在使用这些材料时，系统还应至少与其他可接受的核和非核可选择方案有同样的效率。即使没有可行的选择方案，也要尽可能的有效的利用不可再生资源。

环境用户要求 UR2.1:（与可供资源的一致性）

INS 应能够满足 21 世纪全球的能源需求，而不耗竭易裂变材料/可转换材料和其他不可再生材料，并考虑到这些材料在 INS 以外可合理预期的应用。同时 INS 应高效利用不可再生资源。

为了确保能满足这项要求，必须仔细考虑全球可利用的资源的含义并适当选择系统的边界（见图 6.3）。

当考虑一个 INS 时，应从全球范围，而不是一个国家范围考虑资源的可利用性。而且，要包括目前已探明的资源以外的估计附加资源。是否考虑非常规的来源（例如从海水中提取铀）由 INS 评估者自行确定，并应与 INS 经济评估一致。非常规资源的这种应用不仅包括了这里所论及的环境含义，而且包括了在经济分析中必须论及的成本含义。

有关易裂变和可转换材料提取技术和增殖率等的种种假设，应仔细研究，看其是否符合实际。也必须考虑对其他不可再生资源的需求。

为了开展设施的建造和运行等工作，INS 在任何时间都需要动力（电力或其他动力）。指标 P（t）是在 t 时刻 INS 从各种来源可获得的使用动力，包括 INS 内部和外部来源。在全寿期的任何时刻 P（t）应等于或超过 INS 在 t 时刻所需求的动力 P_{INS}（t）。在 INS 寿期开始阶段所需的全部动力由外部能源供应，以后系统运行和/或发展所需的大部分或全部动力由 INS 内部供应。

还应考虑其他工业造成的资源耗竭，及其对这些工业的重要性。

环境用户要求 UR2.2:（足够的净能量产出）

INS 的产出能量应在可接受的短期内超过实现和运行 INS 所需的能量。

INS 产出的净能量是系统产生的超过其建造和整个预期寿期运行所需能量的可用能量。在可接受的短期内净能量产出应成为正值。很明显，这段时间应越短越好，利益相关者的共识将确定能量平衡产出成为正值的时间目标（可接受限度）。

世界核协会（WNA）完成的核能系统研究报告表明[6-6]，今天核能系统所产生的能量远超出其所消耗的物料和能量（20 倍或更高）。由于更有效的利用燃料、简化设计和使用改进的材料和建造技术，可以预期该比值对 INS 将更高。

下面简要介绍对核能系统环境性能评价方法的要求。

6.4. 对评价方法的要求

6.4.1. 要考虑的因素

在对提出的能源系统进行环境效应分析时，应考虑所有相关因素（源项、应激物、途径、接受体和终端）。

图 6.1 说明了评价一个方案环境效应所包括的因素。在应用到概念设计时，为了实际可行只需要对关键的相关因素进行详细分析。当目的仅是进行系统的相互比较时，可进一步地简化，排除共同因素。

首先要识别的因素是应激物的源项：电厂，辅助设施等。每一个源项都有相关的应激物：排放放射性核素和化学毒物等。每种应激物均可能进入环境并通过大气、地表水等不同途径扩散。每种途径都有相关的诸如人类、水生态系统等接受体。每种接受体可能有不同的终点或可能受应激物影响的范围，例如人类可能在健康和财产价值等方面受到影响。

参考文献[6-7 和 6-8]等 IAEA 出版物，对所有应当考虑的相关因素进行了全面综述。

一些 INPRO 核能系统很可能在没有对系统各组成部分指定任何具体场址的情况下接受评估。因此，可能需要假定某些重要的场址特征或场址特征的范围。不应脱离所作的场址假定得出任何有关系统环境性能的结论。

6.4.2. 全系统方法

应该通过考虑能源系统总体（包括各类过程、活动和设施）在系统寿期各阶段可能产生的环境效应，将提出的技术环境性能作为一个整体进行评价。

能源系统的所有组成部分可能引起相互作用的环境效应。对于作为一个整体

的系统而言，从考虑单个组成部分得出的结论可能是片面的。因此，需要考虑协调与协同。

能源系统的不同组成部分可能分别位于不同的管辖范围，其对环境应激物的反应和看待环境效应的方式不同。这一点不应当妨碍客观的系统整体评估，不必考虑国界。

尽管要求考虑整体系统，适当的作法还是做一些如第 6.5 节所讨论的合理简化。

6.4.3. 完整的物流

应当考虑所有的输入、输出和通过系统的全部重要物流和能量流。

物流和能量流分类如下（图 6.3）：

- 系统各组成部分之间的物能流；
- 从自然环境直接进入系统的物能流；
- 流入和来自系统以外的工业部门的物能流；
- 从系统进入环境的物能流。

分析净物流有两个目的：(1)评估与物流相关的环境应激物的潜在效应；（2）提供相应资源耗竭的度量。

物质和能量的流量（即任何内部再循环利用数量的净值）可能是很大的。生产这些物料将产生相关的、未在系统本身中直接考虑的环境负面效应，但是应对这些效应加以考虑。否则，不同能源系统比较就是以不全面的信息为依据的。

应当对不可再生资源的耗竭进行分析，以保证预期的能源生产和系统必须运行的时间与可利用的资源相协调，以及与所考虑的能源系统以外的资源使用相协调。

6.4.4. 非常规事件

应当评估整个系统正常运行以外事件引起的负面环境效应的可能的重要性。

现代核能系统发生造成严重环境放射损害事故的概率非常低。但是，这种潜在的事故的后果一直影响着核技术的可接受性。核安全的目标在于确保对人类健康效应的概率保持在可接受的低水平；但是，对环境其他部分影响的考虑正处于发展的初期阶段，因此看来需要对这类影响予以比现在所做的更多的考虑。应提高对严重事故的潜在环境效应的认识。这种效应可能涉及与传统安全分析所考虑

的不相同的源项、途径、应激物以及终端。

核能系统的任何部分都可能发生影响环境的非常规事件。传统的核安全体系在多数情况下不考虑那些严重性比较低而发生的可能性比较大的事件。但是，在完整的环境评估中应包括这类事件。

6.5. 评估方法

6.5.1. 物料和能量衡算

全寿期评估

全寿期评估（LCA）[6-9]是一种系统化方法，广泛用于评估技术或生产过程（从提取原料到废物处置，即摇篮到坟墓）的环境效应。LCA 要求在可能影响环境的整个生产寿期的各个阶段对排放物和物料消耗进行识别和量化[6-10]。LCA 包括估计系统内的直接源项和间接源项二者的排放物，例如与生产系统内实体构筑物用的建筑物料所需的能源相关的排放物。为了区分拟议发电技术，只考虑潜在环境效应的主要贡献者可能是合适的。这种方法已经在瑞士进行的关于今后电力和供热系统（时间范围 30 年）的环境盘存 LCA 研究中得到应用[6-11，6-12]。

在全寿期盘存（LCI）分析中的全系统物料核算能提供必要的输入项，但是还需要其他重要信息。完整的环境评价一般是应用于具体地点的一项地方工程，评价包括特定场址因素，如地方资源耗竭，对景观、地方基础结构、文化和遗产、政治功效等的影响。使用其他方法可以更有效地说明这些影响，但是这些方法不太可能如 INPRO 所要求的那样能够区分技术的或一般的设计方案，因此在详细的分析中可能不需要包括这些方法，但是省略必须有可靠根据。地方性的和某些非技术问题最好是留到将来实施阶段解决。

使用 INPRO 环境指标评估 INS 环境性能可能要求对 INS 各组成部分或至少那些认为是对环境指标起关键作用的组成部分使用特定的专门知识和工程判断。从已有的研究外推可能为分析创新型系统提供有用的基础。

评估（低概率）事故造成的影响更加困难，但是这些影响原则上可用概率论安全分析（PAS）处理。这里假定 INPRO 方案的安全要求中充分考虑了相关问题，并假定对 INPRO 所考虑的全部燃料循环而言，由于事故使环境受到有害效应的概率保持足够的低，因而在 LCA 中可以忽略。但是当假定的非常规事件的影响对不同的核系统而言不相同时，应采用与第 6.4.4 节一致的方式评估事件相关的环境方面。

物流评估

物流评估（MFA）[6-11，6-13]始于 20 世纪 70 年代，原本是作为一种包括考虑有害化合物的弥散损失在内的控制资源利用的手段而开发的，是一种用于评估环境效应和评估不同能量生产方案可持续性的有前途的工具。MFA 已被证明在指明一个系统中可能需要改进的领域和评估一个系统对一系列情景（enveloping scenarios）的敏感度是有用的。MFA 是对 LCA 的支持和补充，其重要特点是不仅能够进行平衡态分析还能进行动态分析，这一点对于比较燃料循环是重要的。特别是，在燃料循环任何初始过渡阶段，都可能需要考虑特定物料的供给和需求问题。为了应用 MFA，可能有必要将物流量和存量归一化为单位产品（例如电能）的消耗量。

在原则上 MFA 必须考虑系统中的所有物料。在实际中，要就许多因素作些简化：

- 在分析中只是需要包括那些可能区分不同方案和设计的物流和资源流；
- 简化模型可提高分析的透明度和可用性。应优先将分析能力用于对进行所要求的比较最为重要的那些物料平衡；以及
- 一种物流可能是由系统的某一特定组成部分内的物流所支配。

与环境指标关系

LCA 和 MFA 并没有构成一种完整的评估方法。这两种方法通常被过分简化并需要主观判断，从而减弱了其技术严密性。由于下述的原因，LCA 和 MFA 在如何处理某些特定的核问题时并不十分令人满意。

物料量和流向通常不是环境效应的直接度量。环境评估的结果是多种应激物引起的多重效应。有两种基本方法可用于对系统进行相互比较：（1）依据等效原则表示所有效应，根据对各种效应重要性的认识进行加权，对加权的度量求和得到环境危害的单一度量；或（2）根据适合于每种效应的度量对每种影响进行量化，然后应用多变量决策程序。

无论对于哪种方法，为了使其达到符合 INPRO 特定目的可操作程度，都还需要进行某些开发工作。

放射性废物和原料的辐射当量

另外一种依据等效原则的综合分析放射性废物整体环境效应的有用方法是所谓的辐射当量法。这种方法是基于比较放射性废物和原料（铀、钍矿）的不同

性质及其各自对人类健康、动植物生存（生态群）的影响。

用于比较的参数是从允许浓度（Ci/t）和剂量因子（Sv/Bq）中推导出的，后两者是比较物质辐射特性时普遍采用的参数。

其他需要比较的特性包括：总衰变时间，比能释放，辐射当量活度，潜在生物危害（核素活度与剂量因子之乘积）等。

详细的方法介绍可见《核电白皮书》[6-14]的第 13 章。

6.5.2. 环境效应

图 6.4 表示了核能技术寿期环境性能评价工作所包含的分析步骤。图中每一个圆圈表示一个步骤，双圆圈表示总体评估。箭头表示信息传递，包括信息类别、数量以及物料和能量流率。

评估包括如下各点：

- 识别重要的感兴趣的物质：可转换材料和易裂变材料（例如，^{235}U，^{239}Pu）以及其他战略物资。依据探明储量、存量和生产率评估时间相依的净物流。特别是必须对建立平衡燃料循环的初始短期内使用的物料进行说明，并在评估中对再循环使用的物料进行抵免。
- 具有特别风险（例如放射性/有毒）的物质。这里所包含的是高放废物流程中的物流，包括次锕系核素和裂变产物。考虑的重要因素是物质的总量、进入环境的可能性、保持接近环境的时间、以及在环境途径中的移动性。
- 识别具有特殊环境意义的化学品。这些化学品在系统中加工和使用的环境风险评估应与对放射性物质的风险评估同步进行。
- 评估正常运行和非正常运行放射性物质、化学有毒物质和热排放的环境效应。
- 评估系统所有部分的自然资源（如水和土地）利用和耗竭，以及能源利用。

6.6. 评估方法的进一步发展

开发工作应集中于改进 LCA 和 MFA 技术，使其满足 INPRO 的专门要求。初步建议如下。

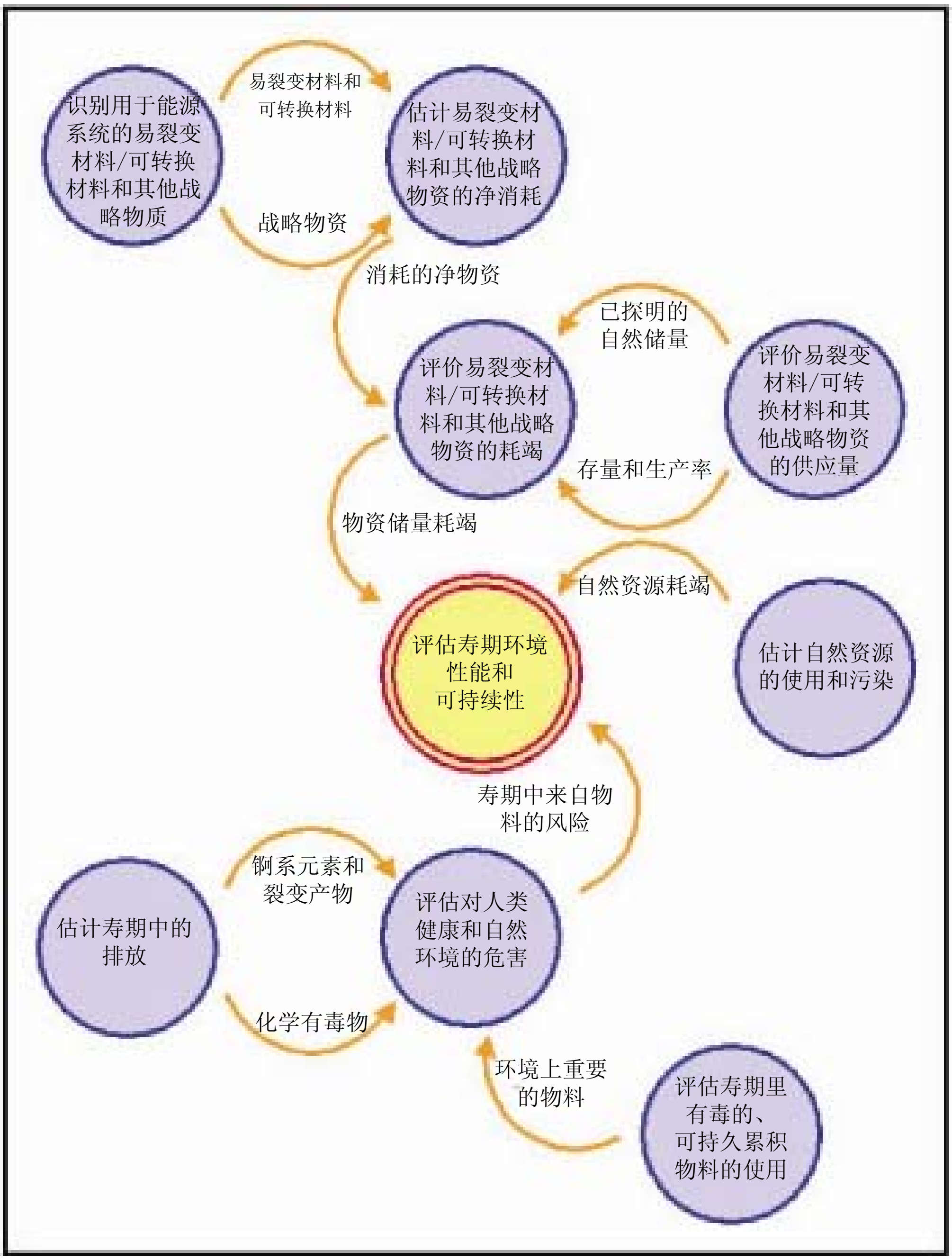


图 6.4. 应用 MFA/LCA 评估环境性能的信息图

6.6.1. 物料衡算方法

为充分细化 LCA 和 MFA，可能要求开发时间相依的物料衡算，以便反映诸如系统效率（可能随时间改进）或能源调配等重要参数的时间相依性。可能会为此目的开发相应的工具，并需要与能源—经济模型或废物管理模型相耦合。一个类似于 DESAE 的程序可能是可实际应用的。该程序除其他量外还确定计算废物活度所需的同位素的量，详细介绍见第 10 章“核电发展的模拟”。

应当识别主要的物料和能源形式，并应当确定评价所有物流和能源流的方

法。图 6.3 提供了信息要求导向。

某些排放物可以忽略，但是需要证明排除它们是正当的。来自正常运行以外事件的潜在释放是重要的。因此，需要在 MFA 中考虑下述因素：（1）寿期各阶段的物流；（2）在各阶段的物料存量；（3）在过渡的和稳定的两种状态下物料可进入环境的时间；（4）不同阶段物料的移动性。

这些考虑将影响系统设计，使之有利于及早安全处置或销毁危险物，影响计划的操作使之有利于隔离物料，以降低应激物总量，并为其处置和销毁做准备。

可能需要为该系统开发一个带有适用于不同阶段的模块的，综合的物能流模型，可以根据一定的要求对该模型进行改动，使其能模拟若干不同的寿期。

6.6.2. 环境危害的度量

必须有一种系统化的前后一致的方法，用于度量核能系统与环境之间物料和能量交换在当地、地区、国家或全球范围引起的环境危害。在某些情况下考虑最大效应（关键居民组概念）是重要的，而其他情况下考虑平均或累积效应更贴切。在为了确定与不同应激物相关的环境危害而进行保守分析时，需要确切的科学依据。危害的度量不仅要能充分表示环境效应，而且应该在 INPRO 中可实际应用。两种可选择的方法是：（1）依据权重因子将所有应激物表示为可公度值（commensurate value）；（2）多变量分析。这两种评估方法都含有一定程度的主观性。因此，为了给可获得广泛接受的比较提供必要的判断，有必要在利益相关者之间开展适当地全面磋商。需要开发能够将这些判断有效地并入到“优良指数”分析或多变量分析中的工具。

将可公度值与每种应激物联系起来的方法可用于评价相关的外部环境成本（见第 6.1.1 节）。这就需要开发将应激物与其引起的环境效应联系起来的方法。分析应激物—效应关系对位置的依赖性可以采用一般的场址特征，或与位于可能部署 INS 设施的不同区域内的特定实例。需要对外部成本的计算方法加以改进以适应未来的经济条件。

6.7. 结语

环境方面问题与创新型反应堆和燃料循环的所有特性有关：安全，经济性，防扩散性，以及可持续地满足 21 世纪全球能源需求的能力。能源系统的环境性能对于其将来的可接受性至关重要，也是评估拟议 INPRO 技术的一个重要方面。

已经确定了两项基本原则：

1） INS 预期的（最佳估计）负面环境效应应完全处在提供相似能源产品的现有核能系统的性能范围内。

2） INS 应能够在高效利用不可再生资源的条件下满足 21 世纪的能源需求。

由基本原则产生了两项用户要求：对 INS 的要求和对其环境性能评估方法的要求。

为筛选和评估 INPRO 技术，可能对某些要求进行简化处理。重点应放在能够区别拟议技术的环境效应，这些效应主要与系统内部的、输入与输出系统的物流和能量流相关（见图 6.3 和 6.4）。

应采用全寿期评估技术和物流分析技术。在前面一节中，对这些技术的开发工作提出了建议。

应建立适当的程序，使利益相关者在诸如专门的筛选准则、环境危害的度量、权重因子（如果适当的话）以及多变量分析（如果适当的话）需要的数值判断等重要事项方面取得共识。

总结论是，已经有了用于筛选和有效比较 INPRO 技术的基本工具。但还需要对这些工具进行进一步开发，以使其适合和扩展应用于特定任务。

第 6 章参考文献

[6-1] BRUNTLAND COMMISSION, World Commission on Environment and Development, “Our Common Future”, Oxford University Press, Oxford (1987).

[6-2] UNITED NATIONS, Conference on Environment and Development, vol. I, Resolutions Adopted by the Conference (United Nations publication, Sales No. E.93.I.8), Rio de Janeiro (1992).

[6-3] The Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, IAEA, Vienna (1997).

[6-4] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991).

[6-5] EUROPEAN COMMISSION, ExternE, Externalities of Energy, DGXII Science, Research and Development, JOULE Programme Reports, Volume 1: Summary Report (EUR 16520 EN), EC (1996).

[6-6] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Energy Analysis of Power Systems, WNA, London (2003).

[6-7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Health and environmental aspects of nuclear fuel cycle facilities, IAEA-TECDOC-918, Vienna (1996).

[6-8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems: Procedures for Comparative Assessment, Technical

Reports Series No. 394, IAEA, Vienna (1999).

[6-9] ISO 2000, “International Standard ISO 14042—Environmental management—Life cycle assessment—Life cycle impact assessment”, ISO 14042:2000(E), Geneva, Switzerland (2000).

[6-10] VAN DEN BERG N. W.,et al., “Beginning LCA; A guide into environmental life cycle assessment”, Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden (1995).

[6-11] DONES, R., et al., “Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland”, PSI Report No. 96-07, Villigen, Switzerland (1996).

[6-12] GANTNER U., et al., “Options for New Swiss Energy Supply Strategies”, PSI Annual Report 1998, Annex IV, Villigen, Switzerland (1999) 11-21. German report: “Perspektiven der zukünftigen Strom- & W.rmeversorgung für die Schweiz–kologische und .konomische Betrachtungen”, PSI Report Nr. 01-12, Villigen, Switzerland (2001).

[6-13] BRINGEZU, S., et al., eds. Analysis for Action: Support for Policy towards Sustainability by Material Flow Accounting Proceedings of the ConAccount Conference 11-12 Sept., 1997, Wuppertal Special 6. 1997, Wuppertal Institute, Wuppertal (1997).

[6-14] MINISTRY OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR ATOMIC ENERGY, White Book of Nuclear Power, Moscow (2001).

第 7 章

废物管理

7.1. 引言

7.1.1. 目的和目标

按照 IAEA 的认识，“……放射性废物可被定义为含有放射性核素或被放射性核素污染，其放射性浓度或活度大于监管部门规定的清洁解控水平，并预期无用的物质”[7-1]。

本章：

- 规定和讨论 INS 中有关放射性废物安全管理的基本原则和用户要求；
- 推荐在放射性废物管理领域中的研究、开发和验证（RD&D）工作，以改进现有的实践和为 INS 研究创新方法。

放射性废物从 INS 的下述环节产生：

- 采矿、水冶和提取
- 铀转化
- 铀富集
- 燃料制造
- 反应堆运行
- 燃料后处理
- 乏燃料管理
- 废物管理
- 退役

本章的讨论适用于上述所有环节。乏燃料的初期贮存（例如在工厂内燃料水池中贮存）见第 5 章“核设施安全”。本章涉及的是乏燃料一旦从初期贮存取出后的管理[22]。

---

[22] 按定义，只要反应堆仍按运行许可证在继续运行，在反应堆现场的贮存就可被认为是初期贮存。一旦反应堆进入退役阶段，乏燃料将被移到废物管理设施中；或在乏燃料仍留在该现场贮存设施中的情况下，此贮存设施就不再被认为供初期贮存用了，而认为是一个需要遵守本章制定的基本原则、用户要求和准则的废物管理设施。

7.1.2. 与可持续性的关系

核能系统要成为可持续性，必须这样来管理，即废物的不利影响或对废物的照管都不得对后代造成不应有的负担。放射性废物的各种组分可能对环境的不利影响必须被有效地防止或减轻，以便使核能在长期内可持续发展。此外，INS 所带来的改进，应包括放射性废物的安全管理方面的改进。事实上，为了取得成功，任何创新技术都必须把废物的长期管理强调到与其对社会的重要性相一致的程度。

7.2. 废物管理领域内的基本原则

一个 INS 要求包括现在和未来都保护人类健康和环境不受放射性废物不利影响的措施。这些措施不应对后代造成不应有的负担。

IAEA 已发布了一套 9 项放射性废物管理基础原则[7-1]。INPRO 决定整个 INS 的 4 项基本原则是从这 9 项基础原则中导出的。INPRO 基本原则与 IAEA 基础原则的关系见表 7.1。

表 7.1. INPRO 基本原则与 IAEA 基础原则之间的关系

<table>
<tr><th>序号</th><th>IAEA 安全丛书原则</th><th>INPRO 基本原则</th></tr>
<tr><td>7.</td><td>放射性废物的产生应保持实际可行的最小化。</td><td>基本原则 1（BP1）：最小化
INS 中的放射性废物的产生应保持实际可行的最小化。</td></tr>
<tr><td>1.</td><td>放射性废物应以这样一种方式管理，即确保人类健康达到可接受的水平。</td><td rowspan="5">基本原则 2（BP2）：保护人类健康和环境。
INS 的放射性废物应以这样一种方式管理，即不论影响可能发生在何时何处，都确保对人的健康和环境的保护达到可接受水平。</td></tr>
<tr><td>2.</td><td>放射性废物应以这样一种方式管理，即保护环境达到可接受水平。</td></tr>
<tr><td>3.</td><td>放射性废物应以这样一种方式管理，即保证考虑对境外的人类健康和环境可能的影响。</td></tr>
<tr><td>4.</td><td>放射性废物应以这样一种方式管理，即以对后代健康的预计影响不会大于如今可接受的相应水平。</td></tr>
<tr><td>9.</td><td>放射性废物管理设施的安全性，在其寿期内必须能得到恰当的保证。</td></tr>
</table>

序号	IAEA 安全丛书原则	INPRO 基本原则
5.	放射性废物应以这样一种方式管理，即不得对后代造成不应有的负担。	**基本原则 3（BP3）：对后代带来的负担** INS 中的放射性废物应以这样一种方式管理，即不得对后代造成不应有的负担。
8.	应恰当考虑放射性废物产生与管理中各个步骤间的相互依赖关系。	**基本原则 4（BP4）：废物最优化** 在 INS 的设计中，应考虑废物产生和管理的各个步骤间的相互作用和关联，以优化整个运行安全和长期安全。
6.	放射性废物应在一个合适的国家法律框架内进行管理，包括明确指定独立监管职能的责任和保障措施。	（这条原则超出废物管理一章的范围。它被列入基础结构那一章中）。

7.3. 与废物管理相关的用户要求和准则

表 7.2 至表 7.5 列出了用户要求和有关的准则。除了 INPRO 的要求外，在 IAEA 安全标准丛书和如今适用的其他文件[7-2 至 7-25]中也提供了导则。

在表 7.2 至表 7.5 每个表的后面，对基本原则（BP）、用户要求（UR）和准则要求（CR）进行了简要讨论。

表 7.2. 与废物管理基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

废物管理基本原则 1（BP1）：（废物最小化） **INS 中的放射性废物的产生应保持实际可行的最小化。**		
用户要求	准　则	
	指　标	可接受限
UR1.1（从源项减少废物）：INS 的设计应使废物在各个阶段的产生都最少，重点是含有可在处置库环境中迁移的长寿命有毒组分的废物。	每吉瓦年产生的α发射体和其他长寿命放射性核素。	合理可行尽量低（ALARP）
	每吉瓦年产生的总放射性活度。	ALARP
	每吉瓦年产生的废物质量。	ALARP
	每吉瓦年产生的废物体积。	ALARP
	每吉瓦年产生的、会成为部分放射性废物的化学有毒元素。	ALARP

以下首先简要讨论废物管理基本原则 1 及其用户要求和准则。

废物管理基本原则 1（BP1）：（废物最小化）

INS 中的放射性废物的产生应保持实际可行的最小化。

与全球接受的防污染原则相一致，INS 的设计应使产生的放射性废物就其活度和体积而言实际上都是最小的。

废物管理用户要求 UR1.1：（从源项减少废物）

INS 的设计应使废物在各个阶段的产生都最少，重点是含有可在处置库环境中迁移的长寿命有毒组分的废物。

基本原则 1 要求放射性废物量应保持在实际可达到的最小。减少源项废物是与 INPRO 目标相一致的最好方法，并且当核电生产增加时可能越显其重要。

在设计阶段减少废物最有潜力，因为设计时为此目的有最大的灵活性来调节系统的特性。通过设计使废物最小化比靠在运行中减少废物的产生更具有内在安全性。减少废物中具有长期毒性且又可在处置环境中迁移的组分的含量是特别重要的。

减少放射性废物的方法包括：

- 各种废物的分拣，目的是避免交叉污染，提高适于控制或可自由释放废物的比例，并减少具有长期危害的废物量；
- 物料的再循环和再利用，不然它们会成为放射性废物；
- 优化设计，以方便设施的退役和拆除；
- 在采矿和水冶操作中提取长寿命衰变产物；
- 减少来自放射性废物管理系统的二次废物。

值得考虑进一步开发的技术包括：

- 处理乏燃料的水法和干法二种方法的改进；
- 长寿命放射性核素在动力堆或加速器驱动系统中的分离和嬗变（P&T）；
- 应用先进材料（如不含钴的钢），以减少活化；
- 提高燃料循环效率；
- 提高反应堆能量转换过程效率；
- 改进去污技术。

表 7.3. 与废物管理基本原则 2（BP2）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">废物管理基本原则 2（BP2）：（保护人类健康和环境）
INS 的放射性废物应以这样一种方式管理，即不论影响可能发生在何时何处，都确保对人的健康和环境的保护达到可接受水平。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td rowspan="3">**UR2.1**：（保护人类健康）。来自 INS 废物管理体系的辐射照射和化学物对人类的危害，应低于现在的接受水平，并且应优化对人类健康的保护，使其免受辐射照射和化学毒物的危害。</td><td>2.1.1 对关键组个体的估计剂量率。</td><td>2.1.1 满足特定成员国的监管标准则[23]。</td></tr>
<tr><td>2.1.2 对工作人员的放射学照射。</td><td>2.1.2 满足特定成员国的监管标准。</td></tr>
<tr><td>2.1.3 工作区化学毒物的估计浓度。</td><td>2.1.3 满足特定成员国的监管标准。</td></tr>
<tr><td>**UR2.2**：（保护环境）
应优化来自 INS 废物管理设施放射性核素和化学毒物的累积释放。</td><td>估计从废物管理设施释放的放射性核素和化学毒物量。</td><td>满足特定成员国的监管标准。</td></tr>
</table>

下文将简要讨论废物管理基本原则 2 及其用户要求和准则。

废物管理基本原则 2（**BP2**）：（保护人类健康和环境）

INS 的放射性废物应以这样一种方式管理，即不论影响可能发生在何时何处，都确保对人的健康和环境的保护达到可接受水平。

必须保护人类免受来自 INS 的放射性废物的放射毒性与化学毒性的危害，特别要注意控制那些人类可能受到辐射照射的各种途径，并注意保证这种照射处于已确定的要求之内。这些要求通常需考虑国际辐射防护委员会（ICRP）和 IAEA 关于保护人类健康免受电离辐射效应的建议值，包括正当性、最优化和剂量限值的概念。因此，INS 的任何废物产生环节或许应是正当的，是适当优化系统的一部分，并与限制了人类所受剂量的合适管理系统相关。

[23] 对于指明了成员国监管要求的各种情况，还应考虑任何现有的国际导则。

与 INS 有关的活动及其后果之间可能相隔一段很长的时间。对 INS 放射性废物管理安全性的评估应考虑这样的事实：利益和照射可能会影响一代又一代的许多代人；长的时间间隔会导致增大安全评价结果的不确定性；放射性核素在衰变。

当放射性核素释放到环境中时，人类以外的物种也可能受到电离辐射照射，这种照射的影响应加以考虑。此外，应考虑在这么长一段时间里，对自然资源未来的可获得性或利用的任何不利影响。

从道德层面上说，考虑放射性废物对人类健康和环境的影响不应局限于一国的疆域。同样，对这种影响的考虑也不应受时间的限制。但应承认这样的道德原则，即对后代的健康及其环境的保护至少要达到目前的标准水平。虽然不可能保证放射性废物在很长的时间跨度内被完全隔离，但要试图实现合理的保证，即不会对人类健康产生不可接受的影响。在考虑 INS 放射性废物的影响时，由于在预见对未来的深远影响方面尚存在的内在困难，因此应考虑长期安全性评估中的不确定性。

废物管理用户要求 UR2.1：（保护人类健康）

来自 INS 废物管理体系的辐射照射和化学物对人类的危害，应低于现在的接受水平，并且应优化对人类健康的保护，使其免受辐射照射和化学毒物的危害。

本要求来自基本原则 2。为了考虑到不确定性，确保有足够的安全裕度和贯彻持续改进的精神，核能系统应以其放射学影响低于目前可接受的水平的观念来设计。虽然存在低辐射水平对人类健康的伤害比现在监管政策中所反映的要低的可能性，但这项预防性原则仍要求辐射防护设计的误差偏向安全方面。

在全面评估 INS 时，应考量废物管理系统设计的优化问题。因此，任何单个组成部分的优化是第二位的。应予考虑的因素包括：

- 所产生废物的放射毒性与时间的关系；
- 正常与事故条件下废物体包容放射性核素的能力；
- 有毒元素通过环境途径的迁移性；
- 含长寿命放射性核素的废物中间贮存的时间长短；
- 废物保持非能动安全状态的程度；
- 废物管理设施内的职业照射。

例如：考虑一些乏燃料组分的分离—嬗变；乏燃料的放射性毒性因放射性衰变而下降；长期的放射毒性主要源自半衰期很长的锕系元素和少数几种裂变产

物；将长寿命核素嬗变为较短寿命的核素会减少废物中的长期放射毒性。然而，这种嬗变或许会要求处理乏燃料，这样做会使这种有毒成分更易迁移。

此外，在很长一段时间内，地面上或近地表的锕系元素的量，可能随它们被处理、贮存和在反应堆或加速器驱动系统内循环而增长。贮存系统的非能动安全性可能受含锕系元素的废物的不同物理化学性质的影响。最终，还可能发生附加职业照射。因此，评估分离—嬗变的效果需要对若干竞争因素进行小心评估。

假如核电在世界能源生产中的份额显著增加，对燃料进行后处理很可能是必需的。这种后处理也会转移锕系元素，不管它们是否去嬗变。因此，如果人们要求将后处理作为是燃料循环的一部分，则评估是否嬗变锕系元素或许是十分困难的。

看来，把一个具有放射性后果的核能系统的所有组成部分都放在单个国家的管辖范围内是不可能的。不过，不应将系统中某个部分的辐射安全分隔开来加以考虑，而应优化核能系统的总体影响。

废物管理用户要求 UR2.2：（保护环境）

应优化来自 INS 废物管理设施放射性核素和化学毒物的累积释放。

如同上一项要求，本项要求也来自基本原则 2。核能系统的所有组成部分都应依照与第 6 章“环境”中规定的各项要求相一致的方式做整合，并且应考虑每个设施中每个部件的全寿命（从摇篮到坟墓）。应考虑超过一国疆域的整个时空的累积释放。还应考虑来自放射性废物管理的非放射性物质的释放。最优先要做的就是通过设计来达到废物产生最小化，其次是将工艺上的改进引入到废物管理系统中。

使来自放射性废物危害最小的废物管理策略，应贯穿到核能系统的全部环节，包括采矿与水冶方法、燃料类型、反应堆、后处理、再循环（有时包括分离—嬗变）和废物处理。

采矿和水冶方法

进行铀采矿和水冶会伴随着向环境释放某些放射性子体，这就是尾矿有长期放射危害的原因。在 INS 的采矿与水冶工艺设计中，应考虑对重要的长寿命核素（例如钍-230、镭-226）进行化学分离的方法。

燃料类型

某些先进循环的燃料类型有如下几种：

- 二氧化钍燃料：钍是一种储量丰富的可转换材料，被用于生产可再循环的易裂变同位素铀-233，而钚和其他锕系元素的产生较少，但会生成在铀—钚循环中不存在的新放射性核素，如镤-231。
- DUPIC 燃料：不用水法处理，把压水堆乏燃料制造成加压重水堆燃料，使高放废物的产生最少，并减少采矿和水冶的废物。在加压重水堆中烧掉锕系元素能降低燃料的放射毒性。
- 铀—钚氮化物燃料：俄罗斯联邦正在研究这种燃料。氮化物乏燃料可以用干法技术再生，而减少液体废物和长寿命放射性核素的分离与嬗变。

反应堆

应审查反应堆设计和运行的各个方面，以确定减少废物量的可能性。提高能量转化效率可减少终端用户每单位能量产生的废物。提高已开采的铀和钍在反应堆的使用率能减少采矿与水冶的影响。

应更多地使用改进过的方法来去污。例如：借助裂变产物和锕系元素在熔融状态下的不同行为特点，可采用熔炼法对活化金属实现部分去污。在反应堆的不同区域分拣各类废物，以避免废物交叉污染。

后处理和再循环

后处理和再循环可包括也可不包括锕系元素和长寿命衰变产物的分离与嬗变。如果包括在内，可以将长寿命的放射性核素从高放废物中分离出来，对其中部分核素进行嬗变，而其他核素可被利用或分别处置。如果不用嬗变，则可将分离出的长寿命锕系元素固定在特制的陶瓷体中，这种陶瓷体可能胜过玻璃固化物。

废物处理

废物管理的几个中间步骤应保证废物包满足永久安全终态的废物接收准则。在评估废物整备方法时，应考虑出自废物处理设施的二次废物和排放的废气或废液。

最理想的减少废物的方法是从源项做起；然而要在有效而经济地运行的同时从源项做起可能还存在一些限制。此外，还可以对已产生的废物进行处理，以减少需要处置的体积。目前，在许多设施中已实现减容，所采用的技术包括：

- 压实、超级压实、焚烧、烧结和熔炼（用于固体废物）；
- 化学沉降、蒸发、离子交换和膜分离（用于废液）；以及
- 浓缩液的热固化（沥青固化、玻璃固化、干燥）。

正在研究的减容新技术包括：

- 冷坩埚熔融和等离子体熔融；
- 非燃烧技术，如蒸汽重整、电子束、紫外光氧化和超临界废物氧化。

表 7.4. 与废物管理基本原则 3（BP3）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">废物管理基本原则 3（BP3）：（对后代造成的负担）
INS 中的放射性废物管理应以这样一种方式管理，即不得对后代造成不应有的负担。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限</td></tr>
<tr><td rowspan="3">UR3.1（终态）：
应规定每类废物可达到的终态，它能提供永久安全而无需进一步变动。计划的核能系统应使废物合理可行地尽快达到终态。此终态应使危险物向环境的任何释放都低于目前可接受的水平。</td><td>3.1.1 技术的可利用性。</td><td>3.1.1 所有需要的技术是现在[24]可利用的或在合理预期内可利用的，其进度应与拟引入的先进燃料循环的进度相一致。</td></tr>
<tr><td>3.1.2 需要的时间。</td><td>3.1.2 使技术达到工业规模所需的时间必须少于达到规定终态所需的时间。</td></tr>
<tr><td>3.1.3 资源的可利用性。

3.1.4 终态的安全性（关键组个人的长期预期剂量）。
3.1.5 达到终态的时间。</td><td>3.1.3 为达终态所需资源（资金、空间、能力等）与核能系统的规模和增长率相称。
3.1.4 满足各成员国的监管标准。
3.15 合理可行尽量短。</td></tr>
<tr><td>UR3.2（废物管理费用的归属性）：
INS 的核能估计成本应包括全部废物在其寿期中的管理费用，其做法是涵盖全寿期任何阶段的累加责任。</td><td>在成本估算中专门列一项。</td><td>已被包括。</td></tr>
</table>

[24] 本文件中所用的“现在”一词指正在评估核能系统可接受性的这段时间。这一尺度显然已打算考虑正在研究的一些先进的废物管理方法，如分离-嬗变或先进的废物体。

下面简要讨论废物管理基本原则 3 及其用户要求和准则。

废物管理基本原则 3（BP3）：（对后代带来的负担）

INS 中的放射性废物管理应以这样一种方式管理，即不得对后代造成不应有的负担。

这个原则是基于道德上的考虑，即获得一项实践利益的那几代人应承担管理由此产生的废物的责任，然而，有限的几项行动可能要移交给随后的几代人，例如，在需要时，对处置设施继续进行有组织的控制。

INS 计划应包括设施的建造和运行措施、预备未来废物安全管理的经费和在适当的时间处置废物。放射性废物管理计划在可能的范围内不应依赖于作为一种必要安全特性的长期制度性安排或行动，因为认识到这种安排的可靠性预期将随时间而降低。

废物管理用户要求 UR3.1：（终态）

应规定每类废物可达到的终态，它能提供永久安全而无需进一步变动。计划的核能系统应使废物合理可行地尽快达到终态。此终态应使危险物向环境的任何释放都低于目前可接受的水平。

从基本原则 3 产生的本项要求，表明放射性废物的管理应以这样的方式管理，即不得对后代造成不应有的负担。此终态要保护目前的人类和环境免受废物的有害影响，并至少按现在可接受的同样水平保护未来的人类和环境。每个终态的定义中应包括：废物体和废物包；容纳废物包的最终处置库；最终处置库的安全状态；以及达到终态的时间表。

按定义，提供永久安全性而无需做进一步变动的废物状态即为终态。

废物体和废物包

理想地讲，设计的废物体和废物包应能持留放射性组分直至它们衰变到满足自由释放的要求。如达不到上述要求，则必须依赖废物管理体系的其他特性。必须证明废物体和废物包适于废物管理方案中所面对的环境条件。

容纳废物包的最终处置库

最终而言，废物的长寿命组分将不得不被留置在最终的废物体中，并被包装起来，废物包被放置在某种形式的废物处置库中。按现有的监管标准，处置库的整体系统应被验证是永久安全的。如今，在几个国家的计划中，最重点考虑的是地下处置库。这些设施的设计和运行各不相同，例如废物包放置的深度、选择的

地质基质和最终处置库密封与关闭前的监测期。

在许多国家，低、中放废物包被隔离在比较近地表的处置库中。保护屏障包括废物包、处置库中的密封材料以及天然屏障，以防物质在地质环境中迁移。大多数先进的核电国家正计划把乏燃料和/或高放废物处置在位于稳定地质基质的较深处置库中。虽然还在不断进展，但已证明这样一个处置库的选址和办证过程仍有困难，因此用于这种废物的处置库还没有投入运行，而都采用中间贮存。

最终处置库的长期安全性能通过分离与嬗变（对长寿命同位素进行辐照，以将其变为稳定的或短寿命的元素）得以改善。这样能大幅减少需要最终处置的长寿命放射性废物的总量。虽然这一技术还有待进一步的研发，但它在明显改善燃料循环中放射性废物的长期安全性上是有潜力的。

安全状况

将安全状况定义为支持确定该废物管理系统的安全性可以接受的全部证据（定量的和定性的）的总和。最起码的要求是要确定能满足全部适用的法律和法规。所规定的终态必须是永久安全的，其含义是后代不会受到今天不可以接受的照射危害。安全状况需包括任何与制度性控制失效有关的风险分析。可以预期，对于那些基于非能动安全（即对于安全性不必实施长期制度性控制）的终态将更容易达到安全状况。假如为了安全性必需长期制度性控制（例如永久贮存的情况），那么在安全状况中应考虑与这些控制的可能失效有关的风险。已经认识到，在 INPRO 评估期间对安全性进行验证通常是不切实际的。总的来说，安全状况或许需要依赖一般可接受的理论分析，外加一定程度上从有关设施的目前运行所得到的各组成部分性能的证据。例如，一种满足现在处置设施废物接收准则的废物体可能就是可以接受的。

废物管理用户要求 UR3.2：（废物管理费用成本的归属性）

INS 的核能估计成本应包括全部废物在其寿期中的管理费用，其做法是涵盖全寿期任何阶段的累加责任。

基本原则 3 说的是放射性废物的管理应不给后代带来不应有的负担。因此，应当向未来的人们提供能使废物维持在安全状态中的手段。提供这些资源（包括资金和经过证明的技术）的责任由已从产生废物的过程中获益的人承担，并且有关的费用应被包括在估算的能量成本中。对各项费用进行内部化处理是完善的环境管理的一个根本性要求。

原则上，管理废物所积累起来的资产应能涵盖累加起来的责任。这与担负现在责任的“资金不足”而计划用将来的钱来补偿的通常做法是相悖的。这种做法未将与废物产生有关的费用进行适当的内部化处理。更重要的是，这种做法是对延迟废物处理和安全处置工作的一个内在刺激。针对核能系统启动后的一个合理期间将不得不采用某些通常的感官判断，因为在这个系统中，为了以平衡资金和责任，仅考虑与最初产生的少量废物有关的责任是不行的。任何与废物管理有关的长期制度性控制的费用都应包括在 INS 的估算成本中。

表 7.5. 与废物管理基本原则 4（BP4）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">废物管理基本原则 4（BP4）：（废物最优化）
在 INS 的设计中，应考虑废物产生和管理的各个步骤间的相互作用和关系，以优化整个运行安全和长期安全。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR4.1（废物分类）：
由 INS 产生的放射性废物应予以分类，以方便 INS 各部分的废物管理。</td><td>分类表。</td><td>分类表允许对产生的废物进行清晰且实际可行的分拣和测量。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">UR4.2（废物处置前的管理）：
废物产生与终态之间的一些中间步骤应合理可行尽量早地进行。这些步骤的设计应保证论述所有重要的技术事项（如散热、临界控制、放射性物质的包封）。各步工艺不应妨碍实现终态或使其复杂化。</td><td>制得终态规定的废物体的时间。</td><td>合理可行尽量早。</td></tr>
<tr><td>技术指标：如符合临界要求；散热措施；
放射性释放控制措施；
辐射防护措施（如屏蔽）；
减少体积/活度措施；
废物体。</td><td>各成员国监管部门规定的准则。</td></tr>
<tr><td>包括整个废物寿期的工艺描述。</td><td>完成从废物产生到终态的工艺链，并充分详述，使所有步骤的可行性都得到明确。</td></tr>
</table>

下面简要讨论废物管理基本原则 4 及其用户要求和准则。

废物管理基本原则 4（BP4）：（废物最优化）

在 INS 的设计中，应考虑废物产生和管理的各个步骤间的相互作用和关系，以优化整个运行安全和长期安全。

在 INS 计划中应考虑放射性废物管理的一些基本步骤：预处理、处理、整备、贮存、运输和处置。在废物管理的这些步骤之间存在相互依赖关系。就放射性废物管理在某个步骤做出的决定可能排除其后的替代步骤，或对其有影响。此外，在废物管理各步骤与 INS 的其他操作之间也有相互联系。应认识到这些相互影响，以便从总体上来平衡放射性废物管理的安全性和有效性。应避免一些可能危及运行安全与长期安全的会引发矛盾的要求。所有放射性废物管理活动（直到包括处置在内）的影响都应在 INS 的设计和规划中予以考虑。

由于放射性废物管理的几个步骤发生在不同时间，实际上，许多情况下是在全部放射性废物管理活动确立之前就必须做出决定。就合理可行而言，在考虑任何一项放射性废物管理活动时，应考虑对未来废物管理活动的影响。

废物管理用户要求 UR4.1：（废物分类）

由 INS 产生的放射性废物应予以分类，以方便 INS 各部分的废物管理。

基本原则 4 涉及的是废物管理过程的运行安全和长期安全在总体上的最优化。这就要求有一个便于对 INS 内各类废物进行优化管理的废物分类表。

放射性废物的分类为废物特性与 INS 中废物管理安全要求之间提供了一条纽带[7-9]。分类表每一个等级中的所有废物应有一个共同的终态，并且这个分类表应被用于整个燃料循环（见 UR4.2 的讨论，关于终态的详细描述）。

废物管理用户要求 UR4.2：（废物的处置前管理）

废物产生与终态之间的一些中间步骤应合理可行尽量早地进行。这些步骤的设计应保证论述所有重要的技术事项（如散热、临界控制、放射性物质的包封）。各步工艺不应妨碍实现终态或使其复杂化。

依据

基本原则 4 涉及到废物处置前管理中的几个步骤。按照定义，废物处于永久安全、不需要再做变动的状态即为终态。在燃料循环运行期间产生的废物的其他

状态被认为是终态之前的中间状态。必须使废物逐步进入其终态。在没有正当理由下把这些步骤留给后代，不符合放射性废物管理的基本原则，即应不得对后代造成不应有的负担。

这些步骤不应使废物达到终态变得复杂。对废物管理的每一步骤都应加小心，即不使废物成为在与计划中的后续步骤不相容的形式。此外，不应将废物放到这样的废物体中，即这将提高使计划的废物体到达终态的难度。应考虑每个过程和活动（包括运输）在正常与事故条件下的安全性，并且应论述有关安全性的重要技术事项（如从系统中散热，在次临界条件下贮存，放射性物质有合适的包容）。

达到终态的时间

一些竞争性因素对废物达到其终态的时间长短有影响。过早处理就排除了采用未来更好的技术。推迟处理和最终处置虽能节省大量近期费用，但在减少不确定度与提高安全性（这是由于要早日达到合适的终态）上就必须给于更多的重担。在某些地区，由于过去把高放废物不适当地长期保持在液体状态（从长期看，这是不合适的），已造成大量此类废物的遗留问题。现在这些废物必须由当代人用极高的代价来进行处理，并如同过去已经发生过的那样，可能会导致对环境的明显事故释放。随着核能使用的不断增加，早日使废物达到一个合适的终态已愈发变得至关紧要。把废物保持在非永久安全的废物形态和条件下，会留下废物永远达不到安全终态的风险。“合理可行尽量早”的规定将责任重担放在避免不必要的推迟上面。

把废物制成最终废物体的处理

这一操作是整个燃料循环的一个环节。在这一环节中，环境效应和人体健康效应都需要加以考虑，并通过对处理步骤获得的净利益来判别其正当性。在核能系统投入使用前，应通过验证或确认其概念设计来证明以工业规模生产废物体和废物包的能力。这样方能使人确信，创新型燃料循环不会产生出不能达到所要求的终态的废物。

工艺过程和活动的安全性

必须考虑和适当论述与正常条件和事故条件下全部工艺过程和活动的安全性相关的技术问题。这些问题与技术密切相关，因而可能随废物管理策略变化而变化。对某些工艺过程来说，排除衰变热可能是需要的；而在另一些情况下，防

止临界可能是个问题；或者，在两个不同的工艺过程间的放射性运输中，可能需要使用专用的运输容器。

实现安全的重要因素和废物处置前废物的其他管理要求包括：

- 废物量及其潜在危害；
- 废物隔离的必要程度；
- 有关废物体的弥散度和迁移率；
- 技术的使用经验和成熟性，以及未来改进的潜力；
- 设备的可靠性及其安全相关功能；
- 活动的复杂性和标准化程度；
- 活动的新颖性和成熟性；以及
- 组织机构的规模、接口的数量和复杂性以及安全文化。

工艺过程的匹配性

放射性废物在一个工艺步骤末端的形态必须与下一步骤相匹配，因此必须努力保证在一个大型复合系统中做到这一点。在整个核能系统及其每个组成部分的寿期内，必须将废物管理系统的设计看作是一个完整的整体。应无任何因素妨碍废物达到终态或使其复杂化。

7.4. 推荐的研究与开发工作

通过研究与开发相应的技术，有可能减少 INS 中放射性废物的不利影响。表 7.6 汇总了在减少这些不利影响方面具有很大潜力的一些推荐领域。详细的信息见 IAEA 在 INPRO 1A 阶段中编制的工作材料。

表 7.6. 推荐的研究工作

废物管理要素	研究、开发、验证目标	预期出成果的时间
核燃料循环中废物的表征方法	减少职业照射和改进效率。 有助于表明符合废物接收准则。	短期（<5 年）
废物处理和整备方法	减少废物贮存和处置产生的放射学影响。 减少要处置的有害物质的总量。改进废物体（化学耐久性，机械稳定性等）。	中期（5—10 年）
乏燃料后处理（包括分离）	改进废物流的性能。减少二次废物。改善可循环核素的分离。	中到长期
中间贮存方法	提高中间贮存的安全性	短到中期
嬗变	减少高放废物中长寿命放射性组分。验证嬗变技术。	中到长期
地质处置	验证处置技术。 改进地质特性鉴定。 加强对水文—地质—化学输运过程的了解。 改进长期监测技术。 推进地质处置库的详细设计。 继续开发性能评价方法。	中期
长期人因分析	与需要长期制度控制有关的废物管理系统的风险评价。	短期
由拟议先进反应堆与燃料循环产生的废物的设计基准比较	将废物管理和乏燃料后处理的安全性纳入燃料循环评估。	短期

7.5. 结语

IAEA 已制定了 9 项关于放射性废物管理安全的基础原则，并从这些基础原则引导出与 INS 的废物管理安全有关的 4 项基本原则。在此 4 项基本原则的基

础上，制订了 7 项用户要求，并已为每项用户要求规定了准则。

创新型系统的放射性废物管理的各方面都能够从下列领域的 RD&D 中获益，例如废物特性鉴定方法、废物处理和整备方法、乏燃料中间贮存、后处理、嬗变、地质处置、长期人因、以及由拟议创新型反应堆与燃料循环产生的废物的设计基准比较等。

第 7 章参考文献

[7-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna (1995).

[7-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety, Safety Standards Series, GS-R-1, IAEA, Vienna (2000).

[7-3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste, including Decommissioning, Safety Standards Series, WS-R-2, IAEA, Vienna (2000).

[7-4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series, WS-R-1, IAEA, Vienna (1999).

[7-5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Waste, Safety Series No 99, IAEA, Vienna (1989) (currently being updated as “Geological Disposal of Radioactive Waste”, Safety Standards Series, DS154).

[7-6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radioactive Control of Discharges to the Environment”, Safety Standards Series, WS-G-2.3, IAEA, Vienna (2000).

[7-7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials, TECDOC-855, IAEA, Vienna (1996).

[7-8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series, WS-G-1.1, IAEA, Vienna (1999).

[7-9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste from the Mining and Milling of Ores, Safety Standards Series, WS-G-1.2, IAEA, Vienna (2002).

[7-10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Radioactive Waste Management in the Operation of Nuclear Power Plants, Safety Standards Series, NS-G-2.7, IAEA, Vienna (2002).

[7-11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Low and Intermediate Level Radioactive Waste, Safety Standards Series, WS-G-2.5, IAEA, Vienna (2002).

[7-12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of High Level Radioactive Waste, Safety Standards Series, WS-G-2.6, IAEA, Vienna (2002).

[7-13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities, Safety Standards Series, WS-G-2.4, IAEA, Vienna (2001).

[7-14] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).

[7-15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series, WS-R-1, IAEA, Vienna (1999).

[7-16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Monitoring in the Mining and Milling of Radioactive Ores, Safety Series No. 95, IAEA, Vienna (1989).

[7-17] INTERNATIONALATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Dose Limitation System to the Mining and Milling of Radioactive Ores, Safety Series No. 82, IAEA, Vienna (1987).

[7-18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Application of the Principles for Limiting Releases of Radioactive Effluents in the Case of the Mining and Milling of Radioactive Ores, Safety Series No. 90, IAEA, Vienna (1989).

[7-19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 1996 Edition (Revised), Safety Standards Series, TS-R-1 (ST-1, Rev.), IAEA, Vienna (2000).

[7-20] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, Pergamon Press, Oxford and New York (1991).

[7-21] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste, Publication 77, Elsevier Science, Oxford (1998).

[7-22] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radiological Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, Publication 81, Elsevier Science, Oxford (1998).

[7-23] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR OFFICE, Occupational Radiation Protection, Safety Standards Series, RS-G-1.1, IAEA, Vienna (1999).

[7-24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Issues and Trends in Radioactive Waste Management, Proceedings of an International Conference, Vienna, 9-13 December 2002, IAEA, Vienna (2003).

[7-25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Vienna (1994).

第 8 章

防扩散

8.1. 引言

在未来核能系统的设计中，对这些系统被滥用于核武器生产的可能性加以考虑是很重要的。这样一些考虑是在国际不扩散机制及其许多国家级及多国协定和制度所要做出的关键考虑之列，而 IAEA 的保障体系正是该机制的一个基本要素。

对于保障协定和附加议定书已生效的国家而言，IAEA 不仅要保证这些国家的核材料不被转用于武器目的，而且还要保证这些国家不存在未申报的核材料及核活动。不过，即使是对于这样一些国家，IAEA 的保障体系也只能在这些国家提供充分合作和透明度的情况下才能提供强有力的保证。只有在可获得充分合作和资源的情况下，任何 INS 才能够得到充分的保障，但重要的是要牢记，除其他因素外，提供保障保证所需的成本将取决于各国所使用的核能系统的性质。随着基于现有技术的核电应用的不断扩大，探知民用核材料的转用或核能和平利用设施的滥用或未申报的核材料或核活动将变得越来越昂贵。

定义

防扩散的定义为核能系统阻止企图获取核武器或其他核爆炸装置的国家转用核材料，或进行未申报的核材料生产，或滥用核技术的特性。

防扩散的程度取决于技术设计特性、运行方式、制度安排和保障措施等诸多因素的组合。这些因素可被分类为*内在特性*和*外加措施*。

在本报告范围内，防扩散限于由国家进行的扩散，不包括防止易裂变材料被亚国家组偷窃或核设施或运输系统遭到破坏。

内在防扩散特性是来自于核能系统技术设计的特性，包括那些有利于外加措施实施的特性。

外加防扩散措施是源于与核能系统有关的国家决定和承诺的措施。

保障是一种外加措施，包括对核能系统有管辖权的一方与核查或管制机构之间缔结的、规定双方应承担的义务和尤其对场地进行核查的法律协定。在不同场合，保障这个术语有不同的含义。在本报告中，**“保障”**指根据国家与 IAEA 之

间的保障协定实施的 IAEA 保障。“**地区保障**”将用来指在诸如欧洲原子能联营条约或瓜达拉哈拉宣言之类的地区协定范围内对各缔约国所做承诺进行独立国际核查的机制[8-1]。“**国家保障**”将用来指与实物保护一起实施的国家衡算与管制制度。

8.2. 内在特性

内在特性的 4 种基本类型已经被确定。人们预期，负责新的核能系统设计的工作组将对这些类型进行考察，并确定适合实现他们各自既定目标的核能系统的具体特性。应该完成防扩散措施有效性的全面评估，以确定内在特性提供的防扩散程度。此评估将对应用补充内在特性所需的外加措施起指导作用。

第一类内在防扩散特性包括核能系统减小核材料在生产、使用、运输、贮存和处置过程中对核武器计划的诱惑力的技术特性。

第二类内在防扩散特性包括核能系统防止或阻止核材料转用的技术特性。

第三类内在防扩散特性包括核能系统防止或阻止未经申报生产直接使用核材料的技术特性。

第四类内在防扩散特性包括核能系统便于核查（包括信息的连续性）的技术特性。

内在特性的实例有[8-5，8-6]：核材料的同位素组成，核材料的化学形式；来自核材料的辐射场；核材料产生的热；来自核材料的自发中子产生率；将民用 INS 用于武器生产设施所需改动的复杂性以及所需要的时间；核材料的质量及体积；转用或生产核材料并将其变成武器可用形式所需要的技能、专门技术及知识；转用或生产核材料并将其变成武器可用形式所需要的时间；限制接近核材料的设计特性。

就未来 INS 而言，应鼓励与其他设计考虑相适应的内在特性的开发和实施。

8.2.1. 有关内在特性的进一步考虑

在最近举行的一些有关 INS 的防扩散讨论中，已提出若干高层次的内在特性。这些特性包括多国核燃料循环设施[25]；同址建设核燃料循环设施；闭合燃料循环；库存；以及源材料的潜在意义。虽然这些特性可能对燃料循环的某些部分有重要意义，但 INS 的整体（整个燃料循环、整个寿期）防扩散是极为重要的，

[25] 多国燃料循环设施虽然要求实施外加措施，但也将提供内在特性，这是因为各国没有自己的燃料循环设施，而需要向和从多国燃料循环设施运输核材料。

并且需要使用得到广泛接受的方法进行全面评估。

集中和同址建设燃料循环设施已经被提出作为解决扩散问题的手段。集中能够对扩散敏感的浓缩和后处理技术进行更有力的国际管制。同址能够限制潜在的扩散敏感材料的运输和贮存。

闭合燃料循环是 INS 防扩散评估中要考虑的一项重要内容。燃料循环的有效闭合是通过解决乏燃料日益增加的存量而获益的内在特性。同样，那些能够将燃料循环中的核材料量降至最低，并且能够将不可能在闭合燃料循环中烧掉的扩散敏感材料的产生量降至最低水平的燃料循环可能有助于防扩散。不过，重要的是要认识到，实现燃料循环闭合并降低核材料量一般不能防扩散；还要认识到，需要为对那些将为某个具体的闭合燃料循环的防扩散做出贡献的许多内在特性和外加措施做综合评估。

在有关闭合燃料循环的讨论中经常被提出的一种考虑是“库存”，或维持过剩的核材料存量。使随时可用于核武器计划的敏感核材料的存量最小化虽然有助于防扩散，但还需要进行一项综合评估，以核实具有小存量的燃料循环不会为未经申报的生产之类的扩散提供其他途径。

天然铀、贫化铀和钍是许多燃料循环的原料。虽然不可直接用于核武器，但这些材料仍然需要在防扩散评估中加以适当考虑，因为它们能够作为源材料来生产可用于武器的材料。

8.3. 外加措施

不论内在特性的有效性水平如何，外加措施总是需要的。

外加防扩散措施源自与核能系统相关的国家决定和承诺，可分成 5 类[8-4]。第一类是国家的与核不扩散有关的承诺、义务和政策。这些包括《不扩散核武器条约》（NPT）和无核武器区条约，全面 IAEA 保障协定 [26]，以及保障协定的附加议定书 [27]。

第二类包括出口国和进口国之间达成的核能系统将仅用于商定目的，并且服从于商定的限制条件的各种协定。

第三类包括控制接触核材料及核能系统的商业、法律或制度安排，包括使用

[26] 全面 IAEA 保障协定基于 INFCIRC/153，[8-2]。

[27] 附加议定书基于 INFCIRC/540，[8-3]。

多国燃料循环设施，以及为回收乏燃料所作的各种安排。

第四类是利用 IAEA 的核查，并酌情运用地区、双边和国家措施，以确保国家和设施运营者遵守不扩散或和平利用承诺（即保障）。

第五类包括针对违反核不扩散或和平利用承诺的法律和制度安排。

8.4. 背景

防扩散与为 INS 所作的大多数其他考虑的不同之处在于：第一，扩散是一种恶意的人为活动。而其他领域主要涉及技术问题，例如设备/系统故障、放射性释放、成本、人体健康。在大多数领域，人们总是假定尊重和遵守协定，而在扩散方面人们总是假定违反不扩散协定。

因为扩散涉及双方（扩散者和保障者/保卫者）之间的相互较量，有时人们用博奕理论来研究扩散问题。每一方所做的选择，在某种程度上将取决于双方预期另一方会做怎样的选择。这种人的因素必须在全面防扩散评估中加以考虑，而且会被进一步复杂化。因为许多分析者认为，扩散者会漠视通常的安全准则和环境准则。

防扩散评估的另一个困难是需要在不泄露敏感细节的情况下处理敏感信息的手段。例如，对核材料特性（例如同位素组成、化学组成等）如何影响一种核爆炸物质的详细解读通常属于保密信息。当只能以粗线条对相关事宜（例如高富集铀与低富集铀或武器级钚与反应堆级钚）加以考虑时，对材料特性的防扩散进行评估这项工作就难以进行。

防扩散评估中所考虑的许多要素在本质上只能进行定性处理，难以量化。某些要素，例如条约、协定和政策是难以量化的，因为在遵守（一种政治判断）的力度、质量和程度上会有变化。另一些要素也难以量化，因为它们涉及正常经验以外的人的选择和活动。例如，从辐照过的靶中提取钚的技术可有很大的差异，这取决于潜在扩散者准备做什么。如果人体健康不是要考虑的重要内容，则钚的提取便可能在使用最低限度屏蔽和防护设备的情况下进行。

8.5. 防扩散领域的基本原则

有两项基本原则为有关 INS 提供高水平的指导。

基本原则 1：INS 整个寿期内必须实施防扩散特性和措施，以便有助于确保 INS 继续是对核武器计划获取易裂变材料没有诱惑力的方法。

基本原则 2：内在特性和外加措施两者缺一不可，不可认为只有其中之一就足够了。

这些基本原则强调内在特性和外加措施两者的重要性。应鼓励那些能够加强防扩散并且与其他设计考虑相匹配的内在特性的开发和实施。同时，不论所开发的内在特性多么有效，仍然需要外加措施。即使防扩散能力最强的 INS，也应采取外加措施，以核实 INS 未被改动（旨在降低内在特性可提供的屏障强度）。

8.6. 防扩散领域的用户要求和准则

5 项高水平的用户要求为有关 INS 提供指导。正如以上所指出，这个用户要求清单不是一个完整和终级的清单，而只是提供高水平的指导。将需要使用一些清楚和透明的工具进行防扩散评估，以便对照这些准则评价 INS。

以下表 8.1 和表 8.2 为上面确定的基本原则制订了用户要求和准则。

表 8.1. 与防扩散基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">基本原则 1（BP1）：INS 整个寿期内必须实施防扩散特性和措施，以便有助于确保 INS 继续是对核武器计划获取易裂变材料不具诱惑力的。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求（UR）</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR1.1 有关不扩散的国家承诺、义务和政策应是充分的。</td><td>1.1.1 有关不扩散的国家承诺、义务和政策。</td><td>1.1.1 国际社会可接受的一套承诺、义务和政策。</td></tr>
<tr><td>UR1.2 INS 中的核材料对核武器计划的诱惑力应是低的，包括对可能已在 INS 中生产或加工出来的未申报核材料的诱惑力。</td><td>1.2.1 材料诱惑力。</td><td>1.2.1 合理可行尽量低（ALARP）[28]。</td></tr>
<tr><td>UR1.3 核材料的转用应该是相当困难和可探知的。转用包括将 INS 设施用于未申报核材料的引进、生产或加工。</td><td>1.3.1 转用的难度及可探知性。</td><td>1.3.1 相应的难度和可探知性足以使实施独立的核武器计划比使用 INS 更具诱惑力。（用于评价这个指标的方法目前尚不存在）。</td></tr>
</table>

[28] 核材料的诱惑力反映在它转用于核爆炸装置的适宜性。度量诱惑力的一般基础可以是辐照的贫化铀、未辐照的贫化铀和非直接应用材料的 IAEA 保障类别。为提供不同材料间更细的分级，需要做进一步的工作来对此分级进行推敲。目前还有可用于评价核材料诱惑力的其他分类方法，例如美国能源部将核材料的诱惑力分为 I—IV 级（见美国能源部第 5633.3A 号令），以及俄罗斯联邦的核材料衡算和控制一般规则（OPUK）。

以下介绍的是提出基本原则 1 及有关用户要求的理论依据。

防扩散基本原则 1（BP1）：INS 整个寿期内必须实施防扩散特性和措施，以便有助于确保 INS 继续是对核武器计划获取易裂变材料不具诱惑力的。

基本原则 1 是，在 INS 的整个寿期内必须实施防扩散的内在特性和外加措施。这要求对 INS 负责的团体在做出一切重大决定（包括设施的概念设计、研究与开发、验证等）时对防扩散加以考虑。这项基本原则进一步解释为，这种实施的目的是有助于确保 INS 继续是对核武器计划获取易裂变材料不具诱惑力的途径。

这项基本原则中使用的*实施*一词指在 INS 的整个寿期中发生的全部活动。在概念设计的早期，*实施*一词指在做燃料循环之类的基本设计选择时对防扩散加以考虑。这些设计选择能够提供一些影响核材料在生产、使用、运输、贮存和处置中的诱惑力的内在防扩散特性（例如同位素含量、化学形式、物理形式、辐射场、核材料流和存量）。

随着设计的进展，*实施*一词指能够在 INS 设施中创造出另一些内在防扩散特性的设计选择，以及使 INS 防扩散性加强的外加措施的政策选择。在建造过程中，必须对关键的内在特性加以核实（核实是一种外加措施），正如设施建成后一样。在 INS 的运行中，应实施保障（外加措施）。在某些场合，可实施燃料安排之类的其他外加措施，以加强防扩散。运营者必须考虑设施改动对防扩散的影响。

在关闭和退役阶段影响 INS 防扩散内在特性的一些实例是设施中的核材料存量，以及部分设施可重新启动用于武器计划的容易程度。

在解释必须实施防扩散特性和措施的理由时，这项基本原则使用了短语“继续是”，其含义是，从定性的意义上讲，现在的核技术为防扩散提供了基准。这项基本原则中使用“易裂变”一词，指的是制造核爆炸装置最终需要的易裂变材料。这非但不会降低可转换性核材料可用于核武器计划的作用，反而认识到可转换核性材料可被用于生产可用于制造核爆炸装置的易裂变材料。

防扩散用户要求 UR1.1：

有关不扩散的国家承诺、义务和政策应是充分的。

成员国有关不扩散的国家承诺、义务和政策对 INS 的防扩散有很大影响。因此，第一项用户要求便是，这些承诺、义务和政策应是充分的。指标是指承诺、义务和政策本身。因为外加措施对防扩散的影响取决于所涉及具体国家的特性，因此，此指标的可接受限度必须是国际社会认为可接受的一套承诺、义务和政策。国产铀的可获得性是国家具体特性的一个实例，它会影响外加燃料供应安排对

INS 防扩散的重要性。

防扩散用户要求 UR1.2：

INS 中核材料对核武器计划的诱惑力应该是低的，包括对可能已在 INS 中生产或加工出来的未申报核材料的诱惑力。

就用于核武器计划而言，核材料的应用情况各有不同，这取决于材料的诱惑力或品质。除拥有通过滥用 INS 的服务、设备或设施获取的、可成为扩散者用于武器计划的猎取目标的核材料外，INS 还会拥有各种已申报的核材料。材料诱惑力的定义目前还没有公认的尺度。材料诱惑力一词一般是指一些关键性的材料特性，例如同位素含量、化学形式等。核材料的几种分类方法可以作为评估材料诱惑力的一般基础。一个实例是使用 IAEA 保障术语中描述的保障类别，并且考虑为获得可用于武器的材料所必需的额外处理步骤。美国能源部有关核材料的材料诱惑力类别 I—IV（美国能源部第 5633.3A 号令）和俄罗斯联邦核材料衡算和控制一般规则（OPUK）提供了类似的分类方法。

第二项用户要求是，INS 中的核材料的诱惑力应是低的。指标是材料诱惑力本身，而可接受限度是这种诱惑力应合理可行尽量低（ALARP）。评估这个指标时，必须认识到 INS 中可能含有多种核材料，而每种材料的品质一定会与其他材料有区别。在确定不同核材料的品质数值表示方法或汇总时，需要多加小心。某些汇总方法可能会淡化其中的某些微弱联系。例如，取这些数值的平均值会掩盖一个 INS 含有大量高品质材料的事实。另外一些汇总方法会无根据地强调某些不重要的材料。例如，燃料循环可在 INS 寿期内的一个短的时期内涉及小量的优质核材料。通过选择最高的材料品质进行汇总，会突出这种材料，而却认识不到转用的机会是有限的。

防扩散用户要求 UR1.3：

核材料的转用应是相当困难和可探知的。转用包括将 INS 设施用于未申报核材料的引进、生产或加工。

扩散的主要屏障是转用的难度和可探知的风险。后者具有威慑作用，并为探知扩散活动及对其做出响应提供了机会。UR1.3 要求转用应是相当困难和可探知的。相应的指标是指这种难度和可探知性。可接受限度为足以使实施一个独立的核武器计划比使用所述的 INS 更有诱惑力。

使一个潜在的扩散者更愿意实施独立的核武器计划所需的难度和可探知性水平取决于扩散者；尤其是取决于他的目标、战略和优先选择。过去的一些扩散企图一直未涉足为和平目的而建造的核能系统，这表明现在的核能系统所具有的这方面的难度和可探知性足以使独立的核武器计划变得更有诱惑力。这可为该指

标提供一个定性的基准可接受限度，并且与基本原则 1 中的下述含义相一致：从定性的意义上讲，现在的核技术为防扩散提供了基准。

用来评价这个指标的方法目前还不存在。可探知性可量化为设计保障和保安系统时使用的一个概念——探知概率。但目前尚没有公认的难度准则。我们将在第 8.7 节中进一步讨论防扩散评估（包括本指标）方法的开发问题。

表 8.2 介绍的是防扩散基本原则 2 的用户要求和准则。

表 8.2. 与防扩散基本原则 2（BP2）相关的用户要求和准则

基本原则 2（BP2）：内在特性和外加措施两者缺一不可，不可认为只有其中之一就足够了。		
用户要求（UR）	准　则	
	指　标	可接受限度
UR2.1 INS 应包含多种防扩散特性和措施。	2.1.1 INS 被多种内在特性涵盖的程度。“程度”是可能的获取途径所占的比重。目前认为每条获取途径均被若干适当的核查措施所涵盖。	2.1.1 某个待定的百分数，并认识到这个百分数或许最好是一个灵活的目标，因为某些内在特性会对核查产生不利影响。 变量：“多种”指的是 UR1.1 中所列可变属性的任何组合。
	2.1.2 涵盖一条获取途径的诸多屏障的牢固度。	2.1.2 牢固度在本质上是一个定性概念。 突破一个牢固的屏障费时费力，因此是可探知的。
IR2.2 应该（在设计/工程阶段）优化与其他设计考虑相匹配的内在特性和外加措施的组合，以便提供成本效益高的防扩散。	2.2.1 包括那些提供防扩散所需的内在特性和外加措施在内的成本。	2.2.1 最低成本（认识到，UR1.1 要求使防扩散达到可接受水平）。
	2.2.2.达到核查机构（例如 IAEA、地区保障组织等）与国家之间商定的外加措施水平的核查方法。	2.2.2.肯定。

以下介绍的是提出基本原则 2 及相关用户要求的理论依据。

防扩散基本原则 2（BP2）：内在特性和外加措施两者缺一不可，不可认为只有其中之一就足够了。

基本原则 2 认为，内在特性和外加措施对于防扩散都是不可或缺的，不可认为只有其中之一就足够了。即便是一个具有极强防扩散特性的系统也需要进行保障（一种外加措施），以便定期重新核实系统的设施未被进行旨在避开内在特性的改动。

防扩散用户要求 UR2.1：

INS 应该包括多种防扩散特性和措施。

这项用户要求的第二个指标是涵盖每个获取途径的屏障的牢固度（强度）。牢固度在本质上是一个定性概念。突破一个牢固的屏障费时费力，因而增大了被探知的可能性。虽然在防扩散方面已经提出了若干种牢固度的专门尺度，但是还没有一种被广泛接受。首先需要评价牢固度并且采用一种尺度，然后才可能为这个指标确定一个可接受限度。

在评价涵盖获取途径的一套屏障的总体牢固度时，重要的是要考虑各种内在特性所提供的屏障之间的相互依赖关系。在某些情况下，克服一种屏障所需的行动也许能够克服多种屏障。例如，高辐射场、化学形式、质量和尺寸似乎都可提供阻止从乏燃料中分离钚的屏障，但是乏燃料的成功溶解或许会同时克服或削弱所有这些屏障。因此，在对该指标进行评价时，要从获取途径角度全面检查各个屏障。防扩散评估方法（包括该指标）的开发将在第 8.7 节进一步探讨。

防扩散用户要求 UR2.2：

应该（在设计/工程阶段）优化与其他设计考虑相匹配的内在特性和外加措施的组合，以便提供成本效益高的防扩散。

虽然国际合作和足够的资源能使每个 INS 得到充分保障，但是实施核查措施所需要的努力却是各不相同的。UR2.2 认为，内在特性与外加措施之间存在成本平衡，因而鼓励对它们进行优化，以求获得更高的成本效益。这项用户要求还认为，内在特性和外加措施必须是与安全性和经济性之类的其他设计考虑相适应的，核查成本必须是合理的。

在这项用户要求中，“优化”一词指的是一个优化过程的结果，而不是一个数学上的优化结果。在 INS 的开发过程中，应考虑那些会降低外加措施（尤其

是核查）成本的内在设计特性。设计中应纳入专门用来增强 INS 防扩散的内在特性，且这些特性与其他设计考虑要相适应，在 INS 的寿期内适用外加措施的预期成本节省将大于纳入内在特性的成本。

这项用户要求的第一个指标是纳入防扩散所需的内在特性和外加措施的成本。某些提供防扩散的技术特性可能会被纳入 INS 的设计中，但这样做主要是出于安全性或功能性之类的其他考虑。在对该指标的评价中，重要的是只包括为提供防扩散所做技术选择的增量成本。当存在两种选择，而成本较高的那种选择因其能够提供更强大的防扩散而被选定时，两种选择成本之间的差应被视为纳入内在特性的成本。

该指标的可接受限度是在 INS 的寿期内所有内在特性和外加措施的最低总成本，同时 INS 必须达到一个可接受的防扩散水平，正如其他用户要求所要求的那样。“最低”一词应该被理解为该项用户要求中规定的优先过程的结果，而不是一个真正数学意义上的最低结果。对该指标的评价可以通过对 INS 的评估来完成。满足可接受限度的条件是，上述评估得出这样的结论，即不存在与其他设计考虑相一致、可显著降低内在特性和外加措施（主要是核查）总成本的潜在设计改变。这类似于对与 INS 设计改变相关的外加措施成本进行敏感性分析。

这项用户要求的第二个指标是，INS 必须拥有满足核查机构与国家之间商定的外加措施水平的核查方法。该指标为 INS 的最大核查工作量确定了一个灵活的限度。这个限度将由核查机构在其拟订核查方法过程中与国家磋商确定。

8.7. 指标评价用变量

需要做进一步的工作来确定指标评价所需的一套变量。

（与用户要求 UR1.1 有关的）指标 IN1.1.1 将通过审查有关不扩散的国家承诺、义务和政策加以评价。这必须是一个针对国家的指标。相关的承诺、义务和政策的实例包括：

- 根据 NPT 缔结的保障协定；
- 出口管制政策；
- 相关的国际公约；
- 用以控制接触核材料和核能系统的商业、法律或制度安排；
- 与核燃料供应与返还有关的双边安排；

- 有关管理核能系统部件再出口的双边协定；
- 核能系统的多国所有权、管理或控制；
- 核查活动；
- 国家或地区衡算与控制系统；
- 能够探知转用或未申报生产的核能系统保障方法；以及
- 对违约行为有效的国际反应机制。

对指标 IN1.2.1 即材料诱惑力的评价需要对诸如下述材料特性进行核查：

- 同位素含量；
- 化学形式；
- 辐射场；
- 产生的热；以及
- 自发中子产生率。

对指标 IN1.3.1、IN2.1.1 和 IN2.1.2 的评价需要对诸如下述各种材料、设施和工艺特性进行核查：

- 每个核材料目标的同位素含量；
- 每个核材料目标的化学形式；
- 每个核材料目标产生的辐射场；
- 每个核材料目标产生的热；
- 每个核材料目标的自发中子产生率；
- 为将民用 INS 用于武器生产设施必须做出改动的复杂性和所需时间；
- 每个核材料目标的质量和体积；
- 转用或生产核材料并将其转化为武器可用形式所需要的技能、专业技术和知识；
- 转用或生产核材料并将其转化为武器可用形式所需时间；
- 限制接触核材料的设计特性；以及
- 材料库存和流动。

对指标 IN2.2.1 的评价需要对包括一切潜在适用的特性和措施及其预计成本在内的外加措施和内在特性进行核查。正如第 8.6 节中所讨论的，预计将通过与敏感性分析类似的评估方法来进行评价，但并不希望对所有内在特性和外加措施进行一个不漏的核查。

指标 IN2.2.2 的一个变数是国家与核查机构之间就核查方法达成的协议。

8.8. 防扩散评估

为满足第 8.6 节中所述的要求，需要利用一种可接受的、清楚和透明的工具对核能系统的防扩散性进行评估的方法。此类评估将被用于众多不同的应用。除了能促进有条理的沟通外，此类评估还可被设计者们用来评估内在设计特性对系统防扩散性的总体影响。这将使设计者们做出明智的选择，并且不断改善设计的防扩散性。一种评估方法也可被核查机制用于评估核查（外加措施）对核能系统防扩散性的影响。这可用来调整外加核查措施，以便为核能系统提供有效和成本效益高的防扩散。最后，评估方法可用于诸如为研究、开发和推广选择一些具有竞争力的核能方案，为出口或进口选择一些备选核能系统，以及为核产品制订出口政策等的决策过程。

人们已形成广泛共识，有必要开发出一种将保证以前后一致的方式做出此类决定的通用评估方法。这种防扩散的通用评估方法很可能是一种复合方法，纳入了与安全及实物安全分析中所使用的那些工具类似的基于情景和属性的工具，用于考查 INS 中材料和设施目标[8-7]。

重要的是认识到，虽然能够开发出用来评估 INS 防扩散性的成套评估方法，但是当比较不同的 INS 时仍必须多加小心。在防扩散方面，不同的 INS 一定存在不同的优缺点。虽然通过评估能够找出存在的优缺点，因此能为决策提供帮助，但通过评估一般不可能就哪个系统在防扩散方面更强做出判断。那些根据评估中找出的优缺点为防扩散打分的汇总方法可能是误导性的，很可能会隐藏其中存在的微弱联系。

防扩散包括纯技术考虑以及针对国家的考虑。某些内在特性提供的防扩散力度可取决于特定国家的信息，例如，尤其是与国家铀资源或其他核设施相关的信息。同样，针对国家的外加措施，例如，为新燃料采购以及乏燃料返还而缔结的燃料供应协议（例如对多边燃料循环设施的承诺），能够影响 INS 的防扩散性。另一方面，不管 INS 在哪个国家得到推广应用，有利于核查的内在特性一般都

可提供防扩散能力。防扩散评估必须解决这两个方面的问题。在需要时，对国家情况进行一些可信的程式化说明，能够早在设计过程就提供处理特定国家问题的手段。

由于防扩散评估是一项艰巨而复杂的任务，因此起初的评估方法极可能是有争议和复杂的，但一种被接受的方法将通过使用和不断的审定而得到完善。重要的是找出任何成套方法中存在的局限性，以避免评估结果被误解或误用。

8.9. 研究和开发

需要集中精力开发一种被广泛接受的、用以开展第 8.7 节所讨论的防扩散评估的方法。这样一种方法将支持人们为开发那些将使既定的防扩散目标得以实现的特定工艺技术特性和制度安排所做的努力。此项工作的一些问题必将在新的核能系统设计过程中加以解决。另一些问题则从更一般的角度加以探索，包括有利于核查的新的技术措施，以及那些能够保证在被实施后一定会获益的新制度的建立。

有待建立协调这样的研究与开发活动的机制。

8.10. 防扩散术语表[29]

本术语表是对本节中使用的主要术语的定义。其他术语可从 IAEA 保障术语表中获得。

获取途径	指一种（假设的）方法，某个国家基于现有（已申报）的核燃料循环能力，可以考虑用它来获取可用于制造核爆炸装置的核材料。获取战略可包括转用战略，并且可能涉及未申报的设施或未申报的核材料的使用。
屏障	对扩散的阻碍。
补充的	从特性和措施角度讲，指可与其他适用的特性和措施结合起来提供完整防扩散的一种特性或措施。

[29] 这些定义供 INPRO 防扩散讨论之用。

信息的连续性	指不间断地了解与核查有关的重要信息。
转用	指已申报的核材料在未经申报的情况下从一个受保障的设施中移出，或利用一个受保障的设施引进、生产或处理未申报的核材料。
外加防扩散措施	指源于与核能系统有关的国家决定和承诺的措施。
内在防扩散特性	指源于核能系统技术设计的一些特性，包括那些有利于外加措施实施的特性。
材料的诱惑力	指一种材料被试图用于核武器计划的程度的量度。这个术语一般指关键的材料特性，例如同位素含量、化学形式等。目前还没有公认的定义。
滥用	指利用接受保障的非核材料、服务、设备、设施或信息来促进任何被禁止的应用。INS 设施可通过可转换靶的辐照、易裂变材料的分离或同位素富集之类的未申报行动而被滥用于核武器生产。
国家保障	指国家衡算与控制系统，以及实物保护和出口管制。
防扩散	指核能系统阻止想获取核武器或其他核爆炸装置的国家转用核材料或进行未申报的核材料生产或滥用技术的特性。 防扩散的程度取决于尤其是技术设计特性、运行方式、制度安排和保障措施等要素的组合。这些要素可被分类为内在特性和外加措施。
冗余的	提供备用的（相同或不同的）构筑物、系统或部件，以便任何一个构筑物、系统或部件在不论任何其他构筑物、系统或部件是处于工作状态还是失效状态都能完成所要求的功能。
地区保障	在诸如欧洲原子能联营条约或瓜达拉哈拉宣言之类的地区协定范围内对国家所作承诺进行独立国际核查的机制。

牢固的	足以抵抗摧毁的强度。
保障	一种外加措施，包括对核能系统有管辖权的一方与核查或管制机构之间缔结的、规定双方应承担的义务和尤其对场地进行核查的法律协定。这个术语在不同场合有不同含义。在本报告中，“**保障**”指的是根据国家与 IAEA 之间缔结的保障协定实施的 IAEA 保障。
目标	可被一个处于获取途径的潜在扩散者利用的核材料或核设施。
未申报的	未按有约束力的协定的要求向核查机构透露的秘密活动、设施或材料。

第 8 章参考文献

[8-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Agreement Between The Republic Of Argentina And The Federative Republic Of Brazil For The Exclusively Peaceful Use Of Nuclear Energy, INFCIRC/395, IAEA, Vienna (1992).

[8-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Structure And Content of Agreements Between The Agency And States Required In Connection With The Treaty On The Non-Proliferation Of Nuclear Weapons, INFCIRC/153 (Corrected), IAEA, Vienna (1972).

[8-3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Model Protocol Additional To The Agreement(s) Between State(s) And The International Atomic Energy Agency For The Application Of Safeguards, INFCIRC/540 (Corrected), IAEA, Vienna (1997).

[8-4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY DEPARTMENT OF SAFEGUARDS, Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems, STR-332, IAEA, Vienna (2002).

[8-5] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY NUCLEAR ENERGY RESEARCH ADVISORY COMMITTEE, Annex, Attributes of Proliferation Resistance for Civilian Nuclear Power Systems, NERAC, (http://www.doe.ne.gov) (2000).

[8-6] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY NUCLEAR ENERGY RESEARCH ADVISORY COMMITTEE, Technological Opportunities To Increase The Proliferation Resistance Of Global Civilian Nuclear Power Systems (Tops), Report by the Tops Task

Force of the Nuclear Energy Research Advisory Committee, NERAC, (http://www.doe.ne.gov) (2001).

[8-7] PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, Guidelines for the Performance of Non-proliferation Assessments, PNNL-14294, May 2003.

第 9 章

国家、地区和国际的基础结构

9.1. 引言

对于 INS 的潜在用户来说，技术要求以外的另一些课题也是重要的。在未来 50 年内，促进或阻碍核电的推广应用的许多因素均与国家、地区和国际的基础结构有关。这一章讨论与此类基础结构有关的若干个问题，定义“基本原则”和相应的“用户要求和准则”，并简要地说明有利于 INS 的推广应用的可能的发展和条件。

人们已认识到，核能系统必须适合需要核电的国家和市场的环境。例如，假如 INS 是由国际性的核电公司拥有和运行的，或者它们安全得可以像“黑箱——核电池”那样交付使用，那就能有利于未来在仅具有有限的本国核基础结构的那些国家中推广应用。为了使这一点成为可能，就需要处理好若干个非技术性的问题，并可能还需要对（例如）国际的或地区的监管机制和监管机构做出安排。可以预料，发展核技术的国家会继续运行和维持核方面的大量基础结构。在此类国家中，要求和规章的全球性标准化使得采用流水线进行大批量的设备制造成为可能，从而有利于降低成本。为了在将来广泛地利用 INS，一个必须得到满足的基本条件是公众接受核电，这一点在决策过程中起着至关重要的作用。

选择核电时需要考虑的因素，在国际原子能机构的早期出版物中做过大量的介绍，例如，可以参看参考文献[9-1]和[9-2]。本章除了以这些参考文件提供的信息为基础介绍基本原则和相应的用户要求外，重点放在从世界环境的预期变化角度考虑可能有利于采用创新型核能概念的那些发展上。

9.2. 基础结构基本原则

与基础结构有关的基本原则定义如下：

应通过地区和国际的安排，提供能够使任何希望采用 INS 供应能源和相关产品的国家无需在本国的基础结构上进行过多投资的多种选择。

9.3. 与基础结构相关的用户要求和准则

与以上的基本原则相对应的用户要求和准则的定义见下面的表 9.1。

表 9.1. 与基础结构基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

基础结构基本原则 1（BP1）：应通过地区和国际的安排，提供能够使任何希望采用 INS 供应能源和相关产品的国家无需在本国的基础结构上进行过多投资的多种选择。		
用户要求	准 则	
	指 标	可接受限度
UR1.1（法律和制度方面的基础条件）：在推广应用 INS 装置之前，应当建立涵盖核责任、安全与辐射防护、运行与保安管理，以及防止核扩散等课题的本国法律体系。	1.1.1 建立法律体系。 1.1.2 确立安全和辐射防护方面的安排。	1.1.1 和 1.1.2：遵守国际标准。
UR1.2（经济和工业方面的基础条件）：拟安装 INS 装置的国家，其工业和经济的基础条件应当足以支持此项目在建造和运行期间的需求。	1.2.1 可获得的信贷额度。 1.2.2 对能源产品的需求量和能源产品的价格。 1.2.3 装置的规模。 1.2.4 支持性基础结构。 1.2.5 拟议的核装置的价值（VNI）。	1.2.1 足够支付该项工程。 1.2.2 足以实现投资回报率（ROI）[30]。 1.2.3 符合当地的需要。 1.2.4 可从国内或国外获得。 1.2.5 VNI＞NII NII=支持核装置所需的本国基础结构投资。
UR1.3（社会－政治方面的基础条件）：应当采取足够的措施使公众接受计划中的 INS 装置。	1.3.1 向公众发布信息。 1.3.2 让公众参与决策过程（以增强公众的接受能力）。 1.3.3 长期的承诺。 1.3.4 公众接受核电。	1.3.1 和 1.3.2 按照国际的最佳实践判断是充分的。 1.3.3 足以实现投资回报率[30]。 1.3.4 足以确保投资的政治和政策风险很小。

[30] 需要作为经济分析的一部分予以评价，参见第 4.3 节。

续表 9.1. 与基础结构基本原则 1（BP1）相关的用户要求和准则

<table>
<tr><td colspan="3">基础结构基本原则 1（BP1）：应通过地区和国际的安排，提供能够使任何希望采用 INS 供应能源和相关产品的国家无需在本国的基础结构上进行过多投资的多种选择。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">用户要求</td><td colspan="2">准　则</td></tr>
<tr><td>指　标</td><td>可接受限度</td></tr>
<tr><td>UR1.4（社会-政治方面的基础条件）：应当可以获得所需的人力资源，以便使营运单位能够保持实现 INS 装置的安全运行所需的安全文化。营运单位应当对该种装置有足够的了解，足以成为懂行的客户，并且应当拥有一支稳定的训练有素的职工和干部队伍。</td><td>1.4.1 可利用的人力资源。
1.4.2 安全文化高于一切的证据。
1.4.3 INS 的社会效益（BTS）。</td><td>1.4.1 按照国际的经验判断是足够的。
1.4.2 具有涵盖技术方面的基础条件和管理领域的定期安全审查机制。
1.4.3 社会效益大于为建立和维持所要求的专门人才队伍所付出的代价。</td></tr>
</table>

下面更详细地讨论与基础结构有关的基本原则和相关的用户要求，以及它们的预期发展趋势。

基础结构基本原则 1（BP1）：应通过地区和国际的安排，提供能够使任何希望采用 INS 供应能源和相关产品的国家无需在本国的基础结构上进行过多投资的多种选择。

核电基础结构可以定义为：为了在特定的国家中成功地推广应用和运行 INS 所必需的，包括法律的、制度的、工业的、经济的和社会-政治的种种设施和基础条件。在这一章中，将重点叙述构成现行的核电基础结构的某些主要设施和基础条件。正如本章引言中所指出的那样，我们还将从世界环境可能发生的变化角度考察推广应用 INS 所必需的基础结构。

人们已认识到，采用核技术供给能源时，需要在本国的能力方面进行一些投资（起码要使该国成为一个懂行的买主）。但这方面的基本概念是：因为国际上有范围广泛的服务和产品可以利用（甚至包括监管方面的服务），因此各国在所

需的先期投资方面拥有多种选择。

关于核能源，不同的国家可能有不同的抱负和能力。例如，也许可以把国家分为以下几类：

1）发展和推广应用核能技术，并且本国具有高度发达的核基础结构，对研制 INS 的组成部分有兴趣。

2）未利用核能技术，但本国具有高度发达的、与核能的非能源利用有关的核基础结构；对研制 INS 组成部分的兴趣有限，但对获取 INS（例如生产电力的 INS）有兴趣。

3）具有巨大的工业生产能力，但是很少甚至没有本国的核基础结构；对获取 INS 和建立它们自己国家的生产能力有需求和兴趣，而对开发 INS 没有兴趣。

4）具有有限的工业生产能力，很少甚至没有本国的核基础结构，但是有能源需求。假如它们无需进行重大的基础结构投资就能获得来自 INS 的能源或能源产品，它们就有可能获益。

国家还可以按其它的因素分类，诸如按包括铀矿在内的本国能源资源、地理区域、人口等分类，也可以按能从资源共享中获益的国家组分类。

在许多国家中，影响现有核电基础结构的一个因素，是电力的生产和分配系统的政府所有制以及核电与国家工业发展战略之间的关联程度。这种情况在有些国家中正在逐渐地发生变化，而在另一些国家中正在比较迅速地发生变化，主要是因为私营的市场经济正在发挥着越来越大的作用，政府的作用则在减弱。然而，正如本文第二章“INPRO 与可持续性概念”中提到的，保证消费者可获得买得起的能源应该是政府的最终责任之一。在有些国家，这种责任包括给确保能源可持续发展的，相应的 RD&D 活动提供必要的基金。

由国际应用系统分析研究所建立的 SRES 情景（参见第 2 章和参考文献[9-8]的第 4.1 节）指出，世界经济的全球化和国际化必将促进核电的增长，并且指出，发展中国家能源需求的增长将是需要加以考虑的重要因素。经济全球化和发展中国家在未来世界能源市场中的重要性，直接要求改造国家和地区这两个层次的基础结构，而且要以促进在发展中国家中推广应用核电系统的方式做好这件工作。

市场结构的变化，为各国之间加强合作以便最佳地利用这种变化提供了机会。随着所需的基础结构在地区级或国际级得到发展，本国的基础结构的重要性有望逐步减小。可以预料，这一点对于对核装机容量的需求量相对较小或工业生产能力有限的国家来说是非常重要的，因为这使它们能够大幅减少必须用在发展

本国基础结构上的投资。

任何关于基础结构长期趋势的评论结果只具有指示性的作用，仅仅是指出为了有利于推广应用创新型核概念而应该努力的方向。预计地区差别仍然是一个要考虑的因素，它的重要性将取决于世界是更趋向于全球性的合作还是趋向于地区性的合作。

基础结构用户要求 UR1.1：（法律和制度方面的基础条件）

在推广应用 INS 装置之前，应当建立涵盖核责任、安全与辐射防护、运行与保安管理，以及防止核扩散等课题的本国法律体系。

开展核电事业对国家和国际两个层次的法律提出了要求。这些要求导致有必要建立一套法律体系，以便为制定安全要求提供基础，并为控制和监督运行与包括防扩散在内的保安安排以及必须满足的其它条件提供基础。建立法律体系的责任落在各国政府身上。此类法律体系的执行涉及各种组织和机构（例如核安全与辐射防护的各个主管部门），它们可以是国家的、地区的甚至是国际的，尤其是在政策、法规以及 RD&D 领域。本国的安全标准应当依从国际商定的标准和实施细则以及已得到正在利用核电的大多数国家批准的有关核装置和废物管理安全的国际公约（参见参考文献[9-1]和[9-2]中列出的参考文献以及参考文献[9-3]第 7 页）。现行的指导性意见可以在参考文献[9-9]中找到，但将来也许需要修改完善，以提高引入 INS 的可能性。

法律结构中的一个重要组成部分是责任的管理。在这一领域，如同安全领域那样，国际合作已经产生了一些国际公约，其中提出了有关责任分配的主要原则（参见参考文献[9-1]第 36 页至第 39 页）。目前，虽然国际上并未商定必须这样做，但利用核能的大多数国家均签署了这些国际公约。

同样，为了控制核技术被扩散至非和平用途，IAEA 成员国之间存在着广泛的合作，产生了用于防止核扩散的核保障机制和许多协议（参见参考文献[9-1]第 39 页至第 41 页）。

如上所述，建立管理核技术的一般应用特别是核电这一应用的法律体系，是各国政府的责任，并以国家法律法规的形式出现。虽然国际的种种实施细则和公约[9-1]给各国的此种法律法规提供了普遍适用的指导意见，但各国之间总会有许多差别。为了得到许可，核反应堆必须遵守国家相关法规的要求。目前，在某个国家中得到的许可证，并不能自动地在其它国家中适用，即使是与反应堆供应商签订合同的国家常常要求出售的反应堆在原产国是经过批准的，情况也是如此。但是，即使在没有这种国际认证的情况下，也可以通过双边协议实现改进、简化

以及减少基础结构和办证费用。

总而言之，法律体系和连带的社会公共机构有一个与众不同的特点，那就是要给核技术建立一个有别于其它工业部门的特殊法规体系，以便反映与核技术相关的那些风险的特殊性质。

两项重要的发展所具有的正面效应可能会影响到现有的法律结构。第一，符合本报告前几章中陈述的“基本原则、要求和准则”的 INS 的发展，有可能使改变有关核能应用的监管办法成为可能。例如，当来自 INS 的经济性和安全风险“与类似用途的工业设施的风险不相上下”，且“除了适用于任何工业设施的那些一般的应急措施外，无需在场区外采取搬迁或疏散措施”时，颁发许可证的要求有可能改变和简化。因此，当满足 INPRO 的“原则和要求”的 INS 将来成为现实时，也许能并应当对与现有的与正在运行的核能系统有关的法律结构进行重新评价。

第二，除了能源设备市场以外，能源市场的全球化和国际化可能会影响管理核能的推广应用的现有法律结构。在日益全球化的世界中，对可持续能源的需求不断增长，法规和办证程序的协调一致可能会有利于核技术的应用。这种在不同市场中间的协调一致，不仅对用户和投资者有利，而且也有利于技术的供应者和开发者。建立协调一致的办证制度（或者换一种说法，达成一种一国的许可证可被国际接受的协议），需要有一项有关办证原则的国际协议。从某种程度上说，此种协议已经存在，而且已反映在国际性的公约、标准和导则中。但是，增强国际合作对于实现尽可能多的协调一致仍然是需要的。各国政府有责任保证本国公民的安全。可以预期，随着核电的风险和潜在的有害效应的减小，政府将变得更愿意接受国际的规章和规程。

通过各个供应国之间的合作和本国没有开发核能系统的工业能力的国家之间的合作，这种协调一致的过程可能会有一个良好的开端。可以期望，核能系统的供应者、投资者和国际的营运者将会发现，商定一种通用办证机制会带来很多好处。这种机制的特点是，在满足商定的规章、标准和要求的基础上，特定的核能系统一旦得到批准，则此种许可证在可能要推广应用该系统的任何国家中都是有效的。这种发展似乎对可能使用该系统的成员国也是有利的。实现这种改进的条件包括没有阻碍此种国际合作的贸易壁垒和能被各国监管部门接受。

由于发展国家的法律结构和建立为了有效地利用这一结构所需的技术能力需要做出巨大的努力，因此，对于对获取核能感兴趣的国家来说，与同样感兴趣的国家合作（也许是地区性的合作）从而分担发展必需的基础结构所需的经费，

当然是有意义的。当供应能源的责任由公营部门转移到国家的或国际的私营企业，这种地区性的合作可能具有更多的好处。

审批核设施、提供独立的监督以及强制执行许可证要求的条件和义务的这一过程，需要一个拥有法定资格的核监管部门，它的知识应足以使其能够履行其义务和责任。可以预料，能源需求的增长主要发生在发展中国家中。然而，在这些国家中，许多国家在核领域没有高度发达的文化基础和基础结构。在此类国家中，地区或国际的审批与监管机制与组织机构，可以起到重要的作用。

为了充分利用不断变化的市场结构，还必须考虑责任安排。由东道国承担剩余责任的这些安排是专门针对核技术的。可以预料，在向国际市场供应核电方面，跨国公司的作用定能不断增长。但这也会使人们质疑现行的事故责任安排。降低核电风险，可能会有利于责任安排方面的变化，预计人们会寻求这种变化。

可能有利于创新型核技术的推广应用的条件可以归纳如下：

- 当创新使未来的核能系统的性能和绩效发生变化时，就能考虑法律结构和社会公共机构方面的变化；
- 为了利用对核能的需求以及核能与 INS 的供应这两方面的全球化与国际化，各国应当合作建立可以更加普遍地适用的办证机制和法规；
- 在国际和地区范围内签订的有关核能系统的选址和运行应该适用的基本原则、要求和相关标准的协定，能有利于增强国家之间的合作，并能为在建立通用的办证制度方面开展合作奠定基础；
- 为了减小建立管理核能系统的应用所需的国家公共机构的负担，可能要做出地区的或国际的安排并建立地区的或国际的公共机构；以及
- 通过确保能够采用处理其它工业风险用的那种方式来处理核电的可保险性（对于核电生产引起的风险），能有利于国际性营业公司的增长。一旦已经证明创新型技术已经使这一做法成为可能，则可能需要审查有关责任的实际安排。

基础结构用户要求 UR1.2：（经济和工业方面的基础条件）

拟安装 INS 装置的国家，其工业和经济的基础结构应当足以支持此项目在建造和运行期间的需求。

在判断核电能否在特定的国家内得到成功的推广应用时，有许多因素是必须考虑的，其中包括与有形的基础结构有关的因素，例如电网与机组装机容量的相

容性，运输重型设备的能力等等。但是，其它一些因素也是会起作用的，例如筹措资金的能力和能否找到合格的建筑承包商。当然，正常运作的电力市场和令人满意的售电价格同样是先决条件。关于各国（特别是发展中国家）在选取核电这一选项时必须加以考虑的那些因素，国际原子能机构发表了好几份研究报告。例如，可参看参考文献[9-1]和[9-2]，以及其中列出的参考文献。

核电能否在特定的国家中得到成功的发展，在多数情况下取决于该国的经济状况。各个国家的工业基础各不相同。当年开发本土核能技术的国家一般都是已工业化的国家，它们有能力制造各种部件和建造核电厂。从卖方国家进口核能技术的国家，通常把采用核电看作它们进一步工业化和促使经济增长努力的一部分。

对于启动核电项目所必需的支持性工业基础结构，没有严格规定的要求。但是，电厂的建设、设备和部件的安装调试以及已建成电厂的运行维护，这些都必须在该国的国内进行。这些工作都会在某个阶段转化为对支持性工业基础结构（例如工程和制造公司）的要求，要求它们供应材料、部件和服务。这种能力常常通过与卖方签订的技术转让协定获得。

电厂一旦建成，就必须供应燃料。核燃料循环由若干种截然不同的工业活动组成。它们可以被划分成前端和后端，前端包含燃料在反应堆中进行辐照之前的那些步骤，后端则包括乏燃料的管理。目前，许多电力公司在国际市场上购买燃料，因而利用的是国际的铀富集能力和燃料生产能力。事实证明，由国际市场供应燃料的做法是可靠的，而且通常比较便宜。然而，对于乏燃料或（由乏燃料的后处理产生的）废物的最终处置来说，通常的做法是各国必须把它们的处置设施放在自己国内的某个地方。如果有能接收不同国家，特别是运行的核能系统较少的国家的乏燃料或废物的处置设施[9-4]，或者将乏燃料返回给生产新燃料的国家，这就能有利于核能系统的推广应用。

在以全球化和国际化为特征的世界中，开发创新型能源概念必然会涉及国际合作和共享性质的开发工作以及 RD&D（例如，IAEA 的协调研究计划（CRP）和第四代国际论坛（GIF）的倡议）。加强使能技术（enabling technologies）领域的合作和使用其它工业部门的先进的开发成果，可以对可持续性做出贡献。

由于预计电力需求的增长主要发生在发展中国家中，因而应当特别注意这些国家中的基础结构。对那些仅仅需求少量核电机组的国家，建立本国的整套供应体系也许是不划算的，或者说并不是必要的。能够为建造、拥有和运行核电系统提供所必需的大部分基础结构的国际性营业公司，可给此类国家提供宝贵的服

务。通过诸如此类机制以及利用与发展中国家的需要更加匹配的创新型设计，可以大大减轻建立和维持所需要的本国基础结构这一挑战。

对可持续能源的需求是对核电技术进行创新的驱动力量。整个系统中的每个组成部分都必须满足这一条全局要求。然而，一个一个地优化这些组成部分也许并不能导致整个系统的优化。应当把包括使用各种类型的反应堆和废物处理在内的整个燃料循环作为一个系统来优化。这种进行系统优化的方案，不可能在需要核电的每个国家内孤立地实施，而必须在全球的或地区的范围内展开。这就要求在应用核电系统的国家之间加强合作。在将来，国际性营业公司有可能在实现这种优化方案方面承担越来越大的责任。

一个国家或一个地区的能源供应安全问题，在选择能源选项时总是起着重要的作用。当能满足发展中国家需要的 INS 成为现实时，核能肯定会是一种可以改善这些国家的能源供应安全的富有诱惑力的选择[9-5，9-6]。

概括起来说，预计以下这几个条件有助于 INS 的推广应用：

- 如果能将分布在不同国家中的设施视为国际的由多个组成部分组成的核能系统的一部分，例如，能够将乏燃料和高放废物返回到新燃料的原产国，那就必定能够加快整个核能系统的优化。这种优化会有助于 INS 对可持续的发展做出贡献；
- 工艺技术的开发者必须了解市场的需求和不同市场的特殊需要，特别是要了解基础结构有限、确实需要核能但需求量又很有限的那些发展中国家的需要；
- 合适的商业安排可以简化对基础结构的要求。建造、拥有和运营（BOO）/建造、拥有和转让（BOT）之类的商业合同可以使当地少建附加的基础结构；
- 参与研究、开发和提供核技术的公司，如能提供包括管理和运行在内的全方位服务，就能促进 INS 的推广应用；而且，
- 如能考虑到发展中国家的具体需要，INS 就一定能做到对发展中国家的能源供应安全做出贡献。

基础结构用户要求 UR1.3：（社会－政治方面的基础结构）

应当采取足够的措施使公众接受计划中的 INS 装置。

公众能否接受核电技术通常被看成是能否成功推广使用附加的核电装机容

量的关键条件。由于公众的接受能力问题是因国而异的，特别是发达国家和发展中国家之间的差别很大，因此处理这个问题没有普遍适用的“万能”方法。在少数国家中，公众的反对已经使建设新核电机组的工作停止，而且已经导致这些国家（甚至包括自己本身就是核电设备供应商的国家）打算逐步淘汰正在运行的核电机组。另一方面，几个大国正在扩大或计划扩大它们的核装机容量，并维持着庞大的 RD&D 计划。尽管有这些差别，对于公众的接受能力这个问题而言，看来有几个共同的问题是需要注意的。

发展 INS，必须尽可能解决人们普遍关心的一些问题，包括发生可能引起大面积甚至超越国界污染的恶性反应堆事故的可能性，因为过去发生过的核技术事故不但影响事故发生国的公众接受能力，而且还影响更为广泛的其它国家的公众接受能力。要解决的其它一些问题包括，有人断言乏燃料和来自后处理的废物是一个无法解决的问题，以及有人宣称民用的核电和核武器有着密切的联系。INPRO 已经在这些领域的每个领域中为创新型反应堆和燃料循环制订了“基本原则”、“用户要求”和“准则”。因此，此类创新型系统正在解决公众接受能力方面的这些问题。但是，这些创新的概念还必须得到验证。国际合作可能会有助于推进这种验证。

国际合作可以做出贡献的一个领域是标准的适用。将国际上接受的安全标准适用于核工程和运行是最为重要的。国家之间在主要标准，以及处理安全问题的安全文化、废物管理、环境保护和防扩散等方面的差别，可能对公众接受核电的能力产生负面效应。就国际上可接受的标准达成协议并在每一个国家中适用这些标准，可以对更广泛地接受核电做出贡献。要设法使自己无法制订此类标准的那些发展中国家可以利用这些必要的技术和知识，以利于这些标准的适用。

另一个因素与包括设计、建造、运行、退役和废物管理在内的核电投资经济周期有关。在大多数情况下，这一周期可以延续 50 年，并且能很容易地延续到 100 年以上。因此，政府和其他利益相关者坚定不移的长期承诺（例如通过适当的法律体系和监管方面的承诺）被看成是成功地实施和经营核电投资的一条要求，也是与公众的接受能力有关的一个条件。就能源的需求和可供选择的供应途径与公众进行坦诚的交流，对于使公众加深对此类长期承诺的必要性和从中可能得到的利益的了解是重要的。还应当开发比较风险评估方法，以便能够正确地将源自 INS 的风险与源自其它能源的风险进行比较，此种评估的结果也需要与公众进行坦诚的交流。在进行这种交流时，清楚地阐明核能在以可持续的和经济的方式解决气候变化问题方面可能发挥的作用以及现有核电厂的绩效，可以起到重要的作用[9-3]。

基础结构方面的用户要求 UR1.4：（社会－政治方面的基础结构）

应当可以获得所需的人力资源，以便使营运单位能够保持实现 INS 装置的安全运行所需的安全文化。营运单位应当对该装置有足够的了解，足以成为懂行的客户，并且应当拥有一支稳定的训练有素的职工和干部队伍。

开发和使用核电技术，需要充足的人力资源和知识。有些国家早已注意到如何获得充足的人力去运行和支持已有的核电机组群。因此，必须花大力气（通过大学和研究中心）确保可以获得所需的人力资源，来促进和利用创新性开发，而这正是“INPRO”的主题。虽然这可能是一件十分棘手的任务，但全球化带来了利用范围宽得多的可共享资源的机会，而不是力争维持国内的涵盖许多个科学与工程学科的完整的技术能力。核能系统所依靠的一系列技术领域，正是由这许多个科学与工程学科构成的。在科研和开发方面的国际合作，可以有助于优化稀缺人力资源的使用，而且同样重要的是有助于优化大型研究与工程试验设施的建造和运行。在全球基础上运作的公司，可以建立给不同的许多国家中的核电厂提供服务的专业人员队伍。同时，INS 的设计应当设法减少电厂的运行和日常维护所需的熟练劳动力的数量，例如设计时考虑可维护性，采用模块化、智能化的部件与系统以及基于计算机的操纵员助手等。

为了保证能对核设施进行适当的检查，需要建立必要的监管能力。无论是依靠直属的队伍，或是通过资助胜任的支持性专门人才去执行监管任务，这种能力都应该是足够的。

为了实现这种国际合作，必须制订计划，以便保持已有的知识和经验，鼓励共同参与科研和开发活动，并加强多国的教育和开发机构。IAEA 已经发起这些活动[9-7]。

9.4. 结语

核电的增长需要靠基础结构的变化来推动。普遍的全球化必将促进核基础结构的全球化。核基础结构布局方面的创新，连同世界经济结构和市场结构的变化，可能会有利于 INS 的推广应用。特别是，采用核电的国家有可能从这种全球化的发展中获益，因为没有必要在每一个国家中都分别建立核电基础结构的全部组成部分。这种全球化要求加强国际合作，以便就运行核电设施时需要满足的条件和准备采用的标准等达成一致。

技术创新导致经济性、可持续性，以及环境、安全、废物处理和防扩散等方面的绩效增大，可以促进基础结构的变化。这种创新加上增强了的国际合作，有

可能大大有助于公众接受能力问题的解决。创新最终将产生不需要采取独特的措施控制各种核风险的核技术。

第 9 章参考文献

[9-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Choosing the Nuclear Power Option: Factors to be Considered, STI/PUB/1050, IAEA, Vienna (1998).

[9-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Power Programme Planning: An Integrated Approach, IAEA-TECDOC-1259, Vienna (2001).

[9-3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Communications on Nuclear, Radiation, Transport and Waste Safety: A Practical Handbook, IAEA-TECDOC-1076, Vienna (1999).

[9-4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical, Institutional and Economic Factors Important for Developing a Multinational Radioactive Waste Repository, IAEA-TECDOC-1021, Vienna (1998).

[9-5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Assessment of the World Market for Small and Medium Reactors, Introduction of Small and Medium Power Reactors in Developing Countries, IAEA-TECDOC-999, Vienna (1998).

[9-6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects, C&S Papers Series No.14/P, IAEA, Vienna (2002).

[9-7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Technology Review-Update 2003, Annex 2, Knowledge Management, GOV/2003/9, IAEA, Vienna (2003).

[9-8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, Report of Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), IAEA-TECDOC-1362, Vienna (2003).

[9-9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handbook of Nuclear Law, IAEA, Vienna (2003).

第 10 章

核电发展的模拟（NPDM）

10.1. 引言

在进行创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）的评估时，评估人员必须考虑一个或多个参考能源情景。例如，如果评估人员的眼光集中在他所在州（省）的能源供应情况，那么他就要考虑他本国的能源情景（或者考虑基于他本国内的某个地区的更加地方化的情景）。预期这个国家情景也会考虑全球的和/或地区的考虑因素，例如，全球的铀需求量、后处理能力等等，因此也必须采用地区的或全球的情景中的某些要素。如果评估人员对全球的能源供应状况（将它作为可持续发展的一个组成部分）感兴趣，那么为了得出全球情景，他必须利用将各个地区和国家组考虑在内的涉及范围更广的情景。为了其它的各种目的，也需要建立模型和程序。这些目的的例子有：供环境评价时使用的物流分析（参见第 6 章）；宏观经济分析，它是考虑不同能源供应选择的相对效益以便得出在讨论成本竞争性时引入的“k”值时的一种输入（参见第 4 章）；以及估计不同能源供应组合的资源要求以便得出对总体可持续性的判断。对于由不同种类的 INS 与其它能源来源的特定组合所组成的特定情景来说，此类分析的结果是形成此种情景的总体可持续性的判断所需的基本输入。

模拟工具包括已有的由 IAEA 规划与经济研究科（PESS）开发出的工具（例如，参见参考文献[10-1，10-2，10-3 和 10-4]），以及在 INPRO 范围内和由各国的活动正在开发的工具。后者在下面的第 10.8 节和第 10.9 节中讨论。

10.2. MESSAGE 程序：能源供应系统及其总体环境效应分析模型

MESSAGE 是一个大规模的动态系统工程优化模型，可用于中长期的能源规划、能源政策分析和情景编制[10-1]。MESSAGE 的核心是“参考能源系统”（RES），它的全部菜单包括一次能源选项、终端能源形式和转换技术。参考能源系统包括化石能源（例如煤、石油和天然气）、核能和各种可再生能源。生产出的终端能源包括液体、固体和气体形式的燃料，电力以及集中供热。酒精、氢和其它合成燃料是现行既定燃料的替代选项。能源需求不包括在这个模型中。它

们可以在终端的或有用的能源这一层次加以定义。就后者而言，需求要区分为工业部门和住宅/商业部门中使用的热能与特殊形式的能源（多半是电力），以及客运与货运的需求。MESSAGE 的结果包括最佳的（也就是成本最小）能源供应和利用结构、资源提取流程图（resource extraction profile）、国际交易能源的边际成本和贸易量、能源部门的投资要求，以及应激物的排放量等。在 MESSAGE 中，能源供应以受整体优化程序支配的替代效应的形式对相关的能源价格作出响应。在 MESSAGE 的最常见形式中，包含了与世界上 11 个地区的每一个地区相对应的各个独立变量。世界上的这 11 个地区通过一次能源和/或终端能源的国际贸易相连接。典型的情况是，世界上的一个地区包括约 150 项技术。

另外，这个模型包括描述从资源提取和进口直到终端使用部门的最终利用的能源转换过程的各种变量。总而言之，涉及 11 个地区的这个 MESSAGE 版本，大约有 35 000 个变量，50 000 个约束条件，具体数量与所包含的新技术数量有关。

10.3. MAED：能源需求分析模型

MAED[10-2]模型基于中长期的社会-经济、技术和人口的发展情景评价未来的能源需求。能源需求被分解成大量的与不同的货物和服务相对应的终端用途类别。模型能估计来自给定情景的社会、经济和技术驱动因素的影响。这些影响结合在一起就能形成一幅有关未来能源需求增长的总图象。

10.4. WASP：维也纳自动系统规划软件包

WASP[10-3]模型是编制电力系统规划用的模型，在发展中国家（超过 100 个国家）中用得非常广泛。在由用户定义的约束条件范围内，WASP 模型能求出最佳的电力生产系统长期扩充计划。约束条件可以包括有限的燃料供应量、应激物排放量的限制、系统的可靠性要求以及其它因素。最佳的扩充计划是通过使贴现总成本最小的办法求出的。

10.5. ENPEP：能源和电力评价程序

目前在将近 60 个发展中国家中使用的 ENPEP[10-4]模型，可对能源系统的发展战略进行全面的评价。它包括以下几个模块：

- 评估能源需求的模块（MAED）；

- 计算市场结算价和在市场条件下平衡能源的需求与供给的模块；
- 使电力部门的扩充优化的模块（WASP）；以及
- 估计来自能源系统的环境负担的模块。

10.6. FINPLAN：分析电力部门扩充资金经济情况的模型

在发展中国家中，资金方面的限制常常是执行最佳的电力扩充计划的最主要障碍。FINPLAN[10-4]能帮助评价计划和项目的资金可行性。它考虑不同的资金来源（包括出口信贷、商业贷款、债券、证券以及类似易物交易的现代融资工具）并且要计算计划的现金流量表、资产负债表、货币比价和其它经济指标。目前有20个以上的发展中国家采用这个模型。

10.7. SIMPACTS：估计电力生产的影响的简化方法

SIMPACTS[10-4]是用于估计不同电力生产链的环境效应和外部成本的、用户友善的简化方法。旨在供发展中国家使用的这种方法，需要的数据少得多，但产生的结果仍然与比较高级的需要大量数据的模型产生的结果不相上下。SIMPACTS 软件包涵盖：

- 对健康、农业、森林和材料的伤害；
- 固体废物，气载与水的污染；以及
- 不同的发电技术。

10.8. DESAE 程序

DESAE（能源系统（核能）的动态变化）程序是目前正在为 INPRO 编制的一种程序，用于计算反应堆特定组合所需的资金和材料资源（参见图 10.1）。这一反应堆组合则是满足规定的随时间变化的核能供应量所需的。因此，用户可以研究提出系统的实用性和物料的收支情况，例如随时间变化的铀需求量、废物积累量、钚的再循环等。这个程序正处于初始的编制阶段。第 10.8.1 节中会讨论到它的未来的发展，打算把它的用途扩展到包括其它的能源供应源，并将它与 IAEA 的程序（例如 MESSAGE[10-1]）结合在一起。

正如图 10.2 中所说明的那样，DESAE 是一个交互式程序。用户指定一个核能需求量（目前只能模拟核电），以及将被用来供应这部分能量的一组反应堆类

图 10.1. DESAE 程序的主要输入与输出数据

型、准备使用的燃料循环和每种燃料循环的成本（隔夜造价、燃料费用、运行成本等等），然后由该程序计算各种参数，诸如随时间变化的天然铀消耗量、乏燃料和其它材料（例如锕系元素和可回收利用的材料）的数量、关键材料（例如锆）的消耗量、需要的投资和近实时的能量成本等。然后，用户可以设法通过改变反应堆类型与燃料循环的组合使这一核能系统优化。本程序不具有优化功能，但是给用户提供可帮助他们选择替代方案的信息。

用户可以从正在使用的和正在考虑开发的各种反应堆中进行选择，它们包括轻水堆、加压重水堆、快中子堆和高温气冷堆等等。用户也可以通过提供相关特性的信息来指定新的反应堆类型。

可以预见，DESAE 将在国家、地区和全球的能源研究中用于以下几个方面：

- 计算不同的核能推广应用战略所需的材料和经济资源，这些数据是人们所关心的，而且可以用于 INS 的评估，例如用于分析环境物料的流量；
- 相互比较不同的核能系统及其组成部分，包括评价和验证各种闭合燃料循环选择的好处，以及确定对于特定的系统来说非常重要的各种反应堆特性；

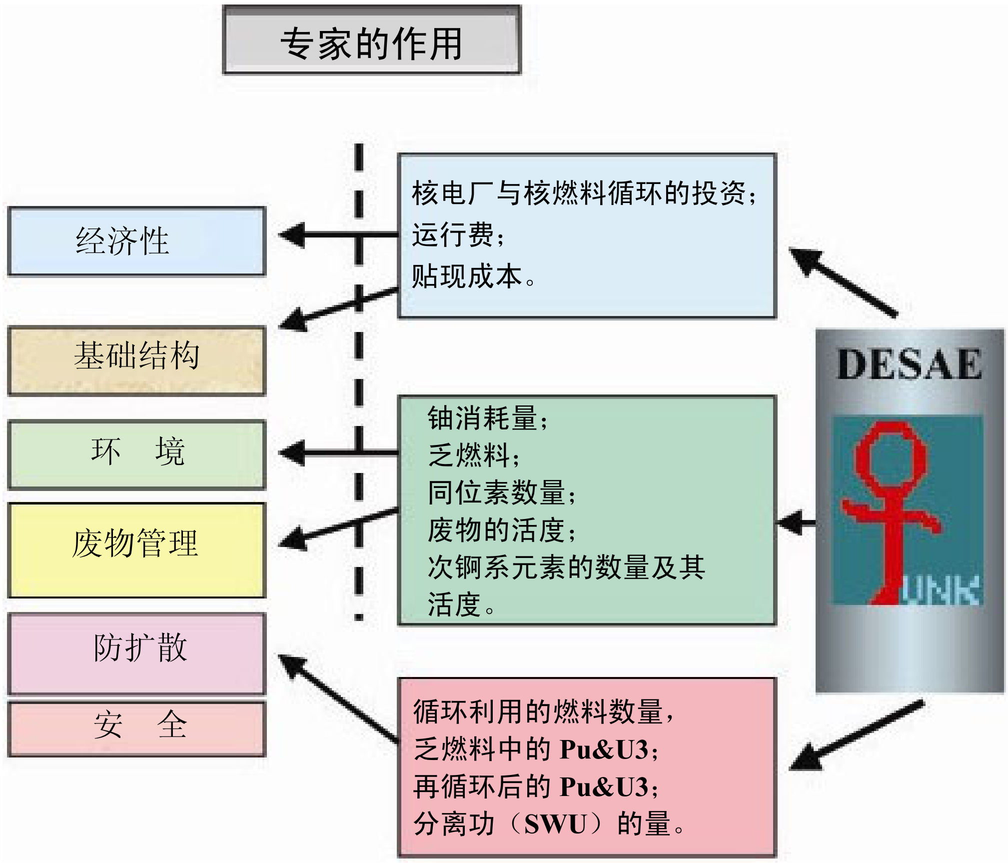


图 10.2. 专家在使用 DESAE 程序时的交互式作用

- 在地区和全球的基础上比较不同的 INS 的结构，以便确定不同的成员国感兴趣的各种系统之间在技术和基础结构两个方面的互补性和协同性。

DESAE 将以这种方式帮助人们在不同国家和不同地区的组成部分的基础上找到全球可持续的核能系统的可能途径。

10.8.1. 未来的发展——DESAE

正如前面已经提到过的，目前正在编制的 DESAE 只能处理核电问题（图 10.3）。在未来，预计 DESAE 的功能将扩展，例如扩展到包括：

- 核能的非电力应用，例如供应热和氢气、海水淡化和次锕系元素的嬗变；
- 用于其它能源供应的模块，即用于天然气、石油、煤、水力和可再生能源的模块；
- 为燃料和其它原材料、核废物、反应堆系统等在地区之间运输模拟；
- 将输出与 INPRO 的“关键指标”值联系起来的模块；以及

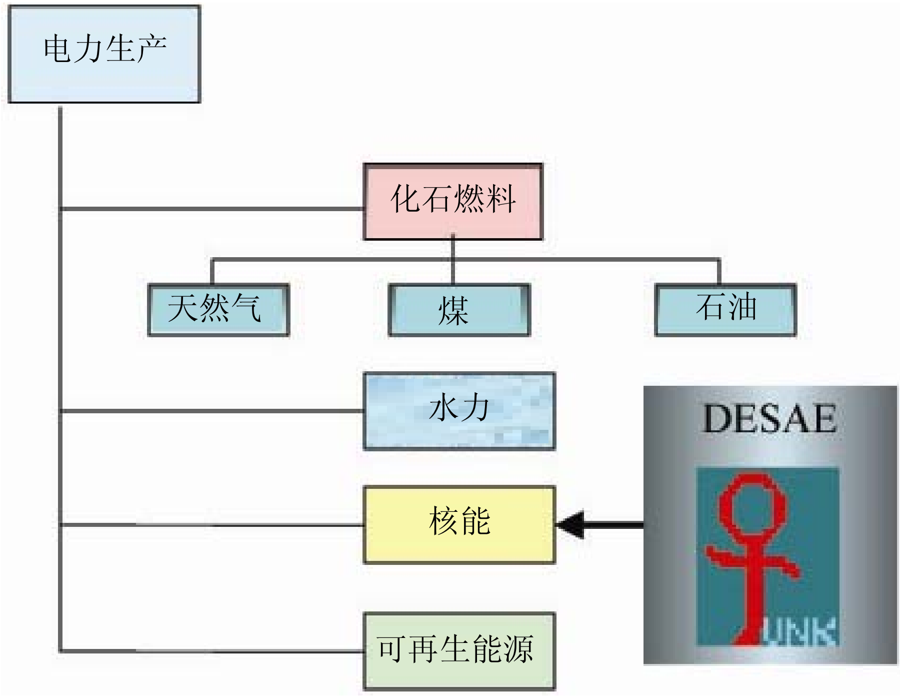


图 10.3. DESAE 程序的现状和它未来的发展

- 将学到的知识反馈到 DESAE 所用的各种成本数据中去。

用户菜单还需要改进，并且还需要做出给本程序的潜在用户提供培训的安排。

10.9. SYRTEX 程序

SYRTEX（系统的技术扩充速率）程序现正在编制中，而且已经用于评估不同的 INS 用于不同的市场条件时的竞争性[10-6，10-7]。在假定了特定的电力需求和特定 INS 的关键特性（包括在给定贴现率条件下的比投资、容量因子、建造时间、燃料价格等等）的基础上，从起始的市场结构出发，可以计算出不同系统的推广速率。计算结果可以用来求出推广速率对于外部费用、基建费用、建造期之类的单个参数的变化的敏感度，因此，它似乎是找出对于 INS 的竞争性和确定 RD&D 的优先次序来说重要的各种指标的有用工具。在本程序中用到的一个重要概念是动态平衡价格概念。

10.10. 结语

使用模拟工具被看成是编制能源规划和 INPRO 的重要组成部分，而且随着模拟工具的进一步发展，它们将被纳入 INPRO 的成套方法中。目前可供使用的许多模拟工具包括 IAEA 的一些程序，例如 MESSAGE[10-1]、 SIMPACT[10-4]以及 DESAE[10-5]。将来，INPRO 将研究对此类程序进行集成的合理性，并研究 SYRTEX [10-6]之类的其它程序和其它成员国中使用的那些程序的潜在用途。

第 10 章参考文献

[10-1] MESSNER,S. and STRUBERGER, M., User's guide for MESSAGE III, WP-95-69, International Institute for Applied System Analysis (IASA), Laxenburg, Austria (1995).

[10-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Model for Analysis of the Energy Demand (MAED), User's Manual for Version MAED-1, TECDOC-386, Vienna (1986).

[10-3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Wien Automatic System Planning Package (WASP), A computer code for power generating system expansion planning, User Manual, Computer Manual Series No.16, IAEA, Vienna (2001).

[10-4] ROGNER H-H, LANGLOIS L. MC DONALD A., Comparative Assessment Beyond the Market, Proceedings EPS 2003: Electric Power Supply Strategy in the 21st Century, Association of Polish Electrical Engineers, Warsaw, Poland, 1-3 October 2003.

[10-5] TSIBULSKIY V.F., DAVIDENKO V.D., SUBBOTIN S.A., The interactive model for quantitative assessment of nuclear energy system key indicators. Code DESAE, Report on INPRO Individual Case Study, Working materials of Consultancy Meeting "To Review the Results of Individual Case Studies for Validation of the INPRO Methodology, 5-9 July 2004, IAEA Headquarters, Vienna, Austria.

[10-6] KARKHOV A.N., Methodology for Evaluations of the Overall Next Generation Systems Economics, ICONE-8197, Proceedings of ICONE 8, 8th International Conference on Nuclear Engineering. 2000, Baltimore, MD USA.

[10-7] TOLSTOUKHOV D.A., KARKHOV A.N., Comparative Analysis of Methodical Approaches to Evaluating the Efficiency of Investment Projects in the Power Industry, ICONE-9523, Proceedings of ICONE 9, 9th International Conference on Nuclear Engineering. 2001, Nice, France.

第 11 章

结论、展望与推荐意见

本报告是创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）1B 阶段第一部分的结论。本报告将各种改进纳入了 INPRO 成套方法中。这些成套方法通过在 14 个不同的个案研究中的试用得到了确认。其中的 6 个是由国家工作组进行的，另外 8 个则是由个人进行的。这些个案研究的结果得到了来自许多次咨询会议的反馈意见的补充。在这些会议上，来自不同领域（例如监管者及供应者/开发者）的代表做出了贡献。

本报告介绍的是用于评估 INS 的经过测试和确认的成套方法。建立的这一成套方法可用于查明特定的核能源系统是否可持续。INPRO 已经向实现它的第一个目标“帮助确保在 21 世纪以可持续的方式提供核能”迈出了决定性的一步。

在 1B 阶段第一部分中进行的个案研究是以各不相同的核系统为基础的，包括小型轻水反应堆、快中子增殖堆、熔盐反应堆、气冷反应堆、重水反应堆、加速器驱动系统，等等。这些研究的最主要目标是测试 INPRO 成套方法，并非真的要评估所考虑的这些系统。

来自 1B 阶段第一部分的研究成果，已经使载于 1A 阶段报告中的 INPRO 成套方法发生了重大的变化。本报告陈述了这些变化。最重要的变化可以归纳如下：

- INPRO 成套方法已经比较清晰地与总的可持续发展概念联系在一起，并且已经成为这一概念的一个不可分割的组成部分。
- 确定了用于满足在基础结构安排方面创新要求的基本原则、相关的用户要求和准则，因而将评估方法的应用扩展到包括这个重要的专题。
- 基本原则、用户要求和准则的数量已经减少，以便消除冗余/重复并改善与经济性、安全、环境、废物管理和防核扩散等方面的基本原则与用户要求的一致性。
- 该成套方法对除反应堆外的燃料循环设施的适用性已得到改进。
- 通过单独处理不确定度、定义几种将各种判断性意见进行汇总的可能性，以及阐明该方法如何为处理近期、中期和长期的 RD&D 战略提供工具等，使得对评估方法的描述得到了改进。

- 对在国家、地区和全球的基础上对未来的能源需求与供应的几种模拟工具进行了介绍。

1B 阶段的这份报告，是朝着建立作为 INS 评估工具的 INPRO 成套方法迈出的一大步。在 1B 阶段的第二部分（参见附件）中，预期这套方法将被用于对完整的 INS 进行整体评估（“从摇篮到坟墓”）。此类评估有望在 2005 年初期开始。它们将是向实现 INPRO 的第二个目标“汇集全部成员国的力量，共同考虑国际和国家行动以实现所期望的创新”迈出的重要一步。1B 阶段第二部分的另一项重要成果，将是产生一份用户手册，该手册可以给成员国提供应用 INPRO 成套方法方面的帮助。在编写这样的手册时，头几次评估的反馈意见肯定是非常宝贵的。将建立一个涉及所有待评估的 INS 的数据库。

当得到这些评估的反馈意见后，预料 INPRO 成套方法和手册将进一步得到改进。可以预见，成员国也许希望成立“INPRO 用户俱乐部”，用于管理这套方法的更新过程和准备使用的这些工具的改进过程。还可以预料，这套方法将用来确定不同的成员国感兴趣的各种系统之间在技术和基础结构两个方面的互补性和协同性，因此将帮助人们找出以不同国家和不同地区的组成部分为基础建造从全球看可持续的核能系统的可能途径。

1B 阶段第二部分及其后的第 2 阶段（参见附件）的工作将涉及核能领域的全部利益相关者。这样一来，INPRO 将通过提供一个论坛实现它的第三个目标“建立一种使所有利益相关者都参与的环境”。在这个论坛中，来自工业化国家和发展中国家的专家和决策者们，除了讨论 INS 在 21 世纪中的发展和推广应用问题之外，还可以讨论与制定核能规划有关的技术问题、经济问题、环境问题、防扩散问题和社会问题等。

附　件

创新型核反应堆和燃料循环
国际项目（INPRO）
1B 阶段（第二部分）和
第二阶段研究范围

国际原子能机构

1. 引言

IAEA 创新型核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO）旨在确定用户对创新型技术的所有要求，并在考虑到各国潜在需求变化的基础上开发对各种创新型方法进行比较的成套方法和导则。INPRO 通过关注经济性、社会可接受性问题以及 IAEA 能够发挥独特作用的领域，例如防扩散、核安全、废物管理和可持续性问题，并通过为用户提供帮助来发挥巨大作用。为了提高推广应用创新型技术的潜力，预计核能赖以发展和使用的基础结构将发生一些变化。

INPRO 第一阶段开始于 2001 年 5 月。这一时期的工作被分为两个分阶段：

- 1A 阶段（结束于 2003 年 5 月）：选择基本原则、用户要求和准则，开发各种 INS 的成套评估方法和导则，为基础结构变更提供建议。
- 1B 阶段（开始于 2003 年 6 月）
  - 第一部分（2003 年 6 月—2004 年 12 月）：

通过国家和个人个案研究来确定和改进成套方法，为进行 INS 评估编写用户手册。

  - 第二部分（2005 年 1 月—2006 年年中）：

利用最新的 INPRO 成套方法评估 INS。

2. 1B 阶段（第二部分）

1B 阶段第二部分（2005 年 1 月—2006 年年中）将包括以下活动和目标，并牢记该项目也应与 IAEA 关于 INS 开发和推广应用工作结合在一起：

- 促进成员国（单个国家和多个国家联合）利用 IAEA 大会决议 GC(48)/RES/13(F) 中规定的最新 INPRO 成套方法来评估 INS，该决议邀

请所有成员国都进行“创新核能系统评估”；

- 通过一种更加量化的办法来持续改进成套方法；
- 最后定稿并发布用户手册，确定并尽可能开发基础模型、程序和技术；
- 为可能在第二阶段开展的 INS 开发工作确定可能的合作框架和研发方案；
- 在互利协作的基础上促进与其他国家和国际 INS 倡议（例如第四代反应堆国际论坛（GIF））的合作；
- 确定国家、地区和全球在需求和资源之间以及基础结构需求之间的平衡，建立一个数据库并进一步开展程序（例如 DESAE）的开发工作；
- 在纳入成员国所考虑的战略的情况下，确定并模拟 INS 推广应用情景；
- 审议作为各种 INS 组成部分的多边核燃料循环（MNFC）的技术和基础结构方案；以及
- 通过定期更新网站内容并发布电子简报促进 INPRO 成员之间的交流。

3. 第二阶段（开始于 2006 年年中）

尽管一些成员国可以继续要求 IAEA 在评估各种 INS 方案方面提供支持，但第二阶段的主要目标是鼓励并支持 IAEA 成员国促进对安全、具有竞争力、环境清洁和防扩散的 INS 的研发、验证和推广应用，以促进可持续发展。

这个目标将/能够通过以研发、制度/基础结构和成套方法为导向的活动来实现：

有关研发的工作：

- 如需要，促进 INPRO 成员国对 INS 的分析；
- 为确定在第一阶段确定的框架下所需要的研发工作并排出优先顺序提供一个论坛；
- 根据目标来帮助评估研发进度，如需要，帮助重新确定研发方向；
- 确定并促成由 IAEA/INPRO 赞助的具体研发（例如 CRP 框架，技术合作项目）；
- 鼓励并为有兴趣的 IAEA 成员国提供指导和帮助，以进行联合研究并执行 INS 开发项目；以及

- 准备国家创新核能技术研发计划轮廓文件。

有关制度/基础结构的工作:

- 进行相关研究和分析以评估 INS 对可持续发展的潜在作用;
- 尽量促进将 INS 用于电力生产和非电力应用;
- 促进 INPRO 成套方法的应用，以便为 INS 在国家、地区或全球水平上的推广应用战略提供指导，并重点强调发展中国家的需要;
- 确定 MNFC 制度和基础结构方案和其他创新型方法,这些方法会促进将核能引入市场并进行进一步推广应用;
- 确定 INS 各方面与公众、政策顾问、决策者和其他利益相关者的沟通方法并鼓励利用这些方法;
- 协助并促进办证程序以及工业法规与标准之间的协调，通过许可证管理当局和国际设计认证来进行分包，维护或发展必要的能力和经验、研究设施等措施来促进 INS 的发展;以及
- 促进分析在国家和地区基础上的燃料循环战略和方案，以确定最佳解决办法，这需要在 INPRO 背景下满足预期的当地和全球限制条件。

有关成套方法的工作:

- 进一步开发 INPRO 成套方法，并对 INPRO 所有领域的评估方法进行改进以支持上述工作。

在第二阶段，INPRO 工作将满足技术用户和技术持有者双方的需求，并特别强调发展中国家的需要。INPRO 将寻求与其他国家和国际倡议的进行持续合作，例如第四代反应堆国际论坛（GIF）。

IAEA/INPRO 秘书处将能够协调并支持成员国开展 1B 阶段（第二部分）和第二阶段的工作。

4. 资源

该项目将利用由 IAEA 相关成员国提供的额外预算捐助和 IAEA 的经常预算。ICG 成员和 INPRO 任务主管将继续执行在考虑到已取得进展的第一阶段的研究范围内确定的基本职能。

有关任务主管的规定及其工作程序将由 IAEA 制定。

5. INPRO 成员

INPRO 成员是根据已制定的规章（通过向 ICG 派遣 CFE，执行工作方案、个案研究或提供直接财政支持）对 1A 和 1B 阶段（第一部分）的 INPRO 做出了贡献的所有 IAEA 成员国和国际组织。在 1B 阶段第二部分和第二阶段，所有参加并对 INS 的评估做出贡献的感兴趣的成员国和国际组织也将有资格成为 INPRO 成员。

6. 指导委员会

由 INPRO 成员代表组成的指导委员会将继续在 1B（第二部分）和第二阶段发挥作用。

7. 进度计划

1B（第二部分）阶段计划在 2006 年年中时公布第一批结果，可能与第二阶段同时进行。第二阶段计划拟于 2006 年年中开始。

缩略语

ADS	加速器驱动系统
AGR	先进气冷反应堆
AL	可接受限度（INPRO）
ALARP	在考虑社会与经济因素条件下的合理可行尽量低
BOO	建造、拥有和运营
BOT	建造、拥有和转让
BP	基本原则（INPRO）
BWR	沸水堆
CFE	免费专家（INPRO）
CNS	目前的核系统
CR	准则（INPRO）
CRP	协调研究项目
DTV	期望目标值（INPRO）
DU	贫化铀
EUR	欧洲电力公司要求
FCF	燃料循环设施
FOAK	一种设计的首座
FP	裂变产物
FR	快堆
GC	IAEA 大会
GHG	温室气体
GIF	第四代反应堆国际论坛
HEU	高浓铀
HF	人因
HLW	高放废物
HTGR	高温气冷堆
HWR	重水堆

I&C	仪表测量控制
IEA	国际能源机构（OECD）
ICG	INPRO 国际协调组
ICS	个人个案研究（INPRO）
ICRP	国际辐射防护委员会
IDC	建造期间利息
IGCC	整体煤气化联合循环（煤电厂）
IIASA	应用系统分析国际研究所
IN	指标（INPRO）
INPRO	创新型核反应堆和燃料循环国际项目（IAEA）
INS	创新型核能系统（INPRO）
INSAG	国际核安全咨询组（IAEA）
IPCC	关于气候变化政府间小组
IRR	内部收益率
ISED	可持续能源开发指标（IAEA）
KI	关键指标（INPRO）
LCA	寿期评估
LCI	寿期存量
LDC	平准化贴现成本
LEU	低浓铀
LOCA	冷却剂丧失事故
LWR	轻水堆
MFA	物流评估
MNFC	多边燃料循环（INPRO）
MS	成员国（IAEA）
NCS	国家个案研究（INPRO）
NEA	核能机构（OECD）
NGO	非政府组织
NII	国家基础结构所需的投资（INPRO）
NM	核材料

NPP	核电厂
NPV	净现值
NPT	不扩散核武器条约
NOAK	一种设计中的第 N 座
NRC	核管会（美国）
OECD	经济合作与发展组织
OECD-90	截至 1990 年，属于 OECD 所有成员国的 SRES 地区
O&M	运行和维护
P&T	分离和嬗变
PHWR	加压重水堆
PIRT	现象确认和分类表
PR	防扩散（INPRO）
PRIS	动力堆信息系统（IAEA）
PSA	概率论安全分析
PWR	压水堆
RBI	相对利益指数（INPRO）
RBMK	石墨慢化燃料通道反应堆
RD&D	研究、开发和验证
REF	经济改革国家的 SRES 地区（前东欧和前苏联）
RES	决议（IAEA 大会）
RG	反应堆纯级
ROI	投资回报率
ROW	世界其他地区的 SRES 区（OECD-90、亚洲和前东欧、苏联除外）
RRI	相对风险指数（INPRO）
SRES	排放情景特别报告（IIASA）
TBD	待定
TOR	研究范围
UNDP	联合国开发计划署
UNDESA	联合国经济与社会事务部
UNFCCC	联合国气候变化框架公约

UR	用户需求（INPRO）
VNI	核设施值（INPRO）
WANO	世界核电运营者联合会
WEC	世界能源委员会
WG	武器级
WNA	世界核协会
WIPP	废物隔离中间工厂（美国）
WSSD	世界可持续发展峰会
WWER	水冷水慢化动力堆

参与编写者名单

除了 INPRO 1A 阶段的参加者（见 TECDOC1362）外，下列专家在 1B 阶段（第一部分）为 INPRO 成套方法做出了贡献：

第 1 章（绪论）：C. Allan（加拿大）, O. Azpitarte（国际原子能机构）, F. Depisch（德国）, M. Khorochev（国际原子能机构）, A. McDonald（国际原子能机构）。

第 2 章（**INPRO** 与可持续性概念）：G. Aslanyan（俄罗斯联邦）, C. Allan（加拿大）, E. Bertel（核能机构）, Y. Bussurin（国际原子能机构）, F. Depisch（德国）, M. Khorochev（国际原子能机构）, V. Kuznetsov（国际原子能机构）, A. McDonald（国际原子能机构）, N. Rabotnov（国际原子能机构）, C. Smyser（美国）, F. Toth（国际原子能机构）, V. Usanov（俄罗斯联邦）。

第 3 章（评估方法）：C. Allan（加拿大）, O. Azpitarte（国际原子能机构）, D.O. Brasnarof（阿根廷）, J.A. Bergallo（阿根廷）, Y. Bussurin（国际原子能机构）, R. Cirimello（阿根廷，主席）, V.K. Chaturvedi（印度）, W. Dams（德国）, F. Depisch（德国）, A. Elsden（英国）, I. Facer（国际原子能机构）, P. Florido（阿根廷）, A.Y. Gagarinski（俄罗斯联邦）, E. Ivanov（俄罗斯联邦）, M. Khorochev（国际原子能机构）, Y. Korovin（俄罗斯联邦）, V. Lelek（捷克共和国）, X. Li（中国）, J.H. Park（大韩民国）, N. Rabotnov（国际原子能机构）, B. Raj（印度）, G. Serviere（法国）, R.K. Sinha（印度，主席）, S.A. Subbotin（俄罗斯联邦）, V. Tsibulskiy（俄罗斯联邦）, D. Tsurikov（俄罗斯联邦）, V. Usanov（俄罗斯联邦）, J. Vergara（智利）, H. Wider（欧盟）, B. Wiesenfeld（法国）, S. Yugay（俄罗斯联邦）。

第 4 章（经济性）：C. Allan（加拿大）, N.K. Bansal（印度）, V.K. Chaturvedi（印度）, S.K. Chung（大韩民国）, R. Cirimello（阿根廷）, W. Dams（德国）, A. Elsden（英国）, P. Florido（阿根廷）, A.Y. Gagarinski（俄罗斯联邦）, L. Langlois（国际原子能机构）, A. McDonald（国际原子能机构）, A. Omoto（国际原子能机构）, H.H. Rogner（国际原子能机构）, R.K. Sinha（印度）, C. Smyser（美国）, D. Tsurikov（俄罗斯联邦）。

第 5 章（核设施安全）：C. Allan（加拿大）, N.K. Bansal（印度）, J.A. Bergallo（阿根廷）, A. Birkhofer（德国）, Y. Bussurin（国际原子能机构）, V.K. Chaturvedi（印度）, R. Cirimello（阿根廷）, G. Clapisson（南非）, D. Delmastro（阿根廷）, F. Depisch（德国）, G.L. Fiorini（法国）, P.A. Fomichenko（俄罗斯联邦）, K. Fukuda

（国际原子能机构）, A.Y. Gagarinski（俄罗斯联邦）, Ch. Ganguly（印度）, M. Gasparini（国际原子能机构）, B. Herutomo（印度尼西亚）, P.E. Juhn（大韩民国）, H.S. Kamath（印度）, B. Kuczera（德国）, A. Omoto（日本）, B. Raj（印度）, R.K. Sinha（印度）, V. Snell（加拿大，主席）, S.A. Subbotin（俄罗斯联邦）, G. Uchiyama（日本）, V. Usanov（俄罗斯联邦）, H. Watzinger（德国）, B. Wiesenfeld（法国）, J. Zheng（中国）, Y. Zou（中国）。

第 6 章（环境）: K. Anantharaman（印度）, J. Anokhin（俄罗斯联邦）, O. Azpitarte（国际原子能机构）, J.A. Bergallo（阿根廷）, A. Boelme（土耳其）, D.O. Brasnarof（阿根廷）, Y. Bussurin（国际原子能机构）, V. Chaturvedi（印度）, R. Dones（瑞士）, K. Dormuth（加拿大，主席）, A.Y. Gagarinski（俄罗斯联邦）, S. Jayashree（印度）, E. Knoglinger（奥地利）, G. Servière（法国）, R.K. Sinha（印度）, S.A. Subbotin（俄罗斯联邦）, D. Tsurikov（俄罗斯联邦）, V. Usanov（俄罗斯联邦）。

第 7 章（废物管理）: N.K. Bansal（印度）, J.A. Bergallo（阿根廷）, Y. Bussurin（国际原子能机构）, K.S. Chun（大韩民国）, R. Cirimello（阿根廷）, G.Q. Deng（中国）, K. Dormuth（加拿大，主席）, M.D. Greneche（法国）, E. Knoglinger（奥地利）, B. Raj（印度）, L. Soukhanov（俄罗斯联邦）, S.A. Subbotin（俄罗斯联邦）。

第 8 章（防扩散）: K.M. Choi（国际原子能机构）, P. Florido（阿根廷）, M.D. Greneche（法国）, E. Haas（国际原子能机构）, J.K. Kim（国际原子能机构）, W.I. Ko（大韩民国）, B. Kuczera（德国）, A. Kumar（印度）, M. Lesage（法国）, R. Nishimura（加拿大，主席）, J.H. Park（大韩民国）, G. Pshakin（俄罗斯联邦）, G. Stein（德国）, Y. Bussurin（国际原子能机构）, M.S. Yang（大韩民国）。

第 9 章（国家、地区和国际的基础结构）: O. Ascroft-Hutton（英国）, S. Chakraborty（瑞士）, G. Clapisson（南非）, I. Facer（国际原子能机构，主席）, B. Gordon（俄罗斯联邦）, I. Grant（加拿大）, S. Gunduz（土耳其）, R. Steur（国际原子能机构）, F. Depisch（国际原子能机构）, E. Vapirev（保加利亚）。

第 10 章（核电发展的模拟）: C. Allan（加拿大）, V.F. Davidenko（俄罗斯联邦）, M. Khorochev（国际原子能机构）, A. McDonald（国际原子能机构）, B. Raj（印度）, R.K. Sinha（印度）, F. Toth（国际原子能机构）, V.F. Tsibulskiy（俄罗斯联邦）, S.A. Subbotin（俄罗斯联邦）, S. Yugay（俄罗斯联邦）。