

# 两个魔鬼之间

## 诺贝尔奖获得者伯顿·里克特讨论核能的前景和问题

**核**能目前正在经历一场复兴，这主要为两个不太密切的需要所驱动：第一是需要多得多的能源来支持全球的经济增长；第二是缓解由于化石燃料的温室气体排放导致的全球变暖。

采用目前的燃料结构，使经济增长会增加排放，而增加排放导致气候变化，气候变化将最终损害经济。核能为摆脱这种恶性循环提供了一条途径。

对21世纪能源需求的许多预测均给出一个基本相同的答案。例如，国际应用系统分析研究所（IIASA）的研究表明，在中增长情景中，一次能源需求到本世纪中叶将增加50%，到本世纪末将再次增加近50%。到2030年，预计发展中国家的一次能源消耗将超过工业化国家。单是中国就将超过美国成为世界最大的能源消费国，并且中国和印度的经济增长率已超过国际应用系统分析研究所的情景假设。

对三种化石燃料中的两种的供应限制已经明显。石油价格已经大幅攀升。需求每年在以每天约150万桶的平均速率增加，这需要每10年增加一个沙特阿拉伯的石油产量才能满足增长的需求。

尽管有大量的天然气，但却存在着运输限制。天然气的价格也一直在上涨，目前已达到每百万英热单位

9~10美元的前所未有的水平。

惟一能保证充足供应的化石燃料是煤。但是，煤具有严重的污染问题，需要采用昂贵的技术方案来控制具有大规模经济影响的环境问题。

对全球变暖的担忧日益增加，甚至美国政府也最终说，有一个问题。政府间气候变化小组（IPCC）预测，正常情况下，大气中二氧化碳含量在本世纪末将增加到750 ppm，导致全球温度上升2℃~5℃，赤道温度升得少一些，两极温度升得多一些。

如果温度增加2℃并且是平稳地进行，我们肯定能够适应；如果温度增加5℃并且伴有气候的不稳定性，经济和社会破坏将非常严重。

防止某种全球变暖虽为时已晚，但限制这种效应需要摆脱碳基燃料。全球变暖问题已促使一些著名环境学家重新思考他们对核电的敌视态度。他们要面对的一个问题是，对于全球变暖与核能这两个魔鬼，他们更愿意和哪个一起生活呢？

在这些环境学家中，James Lovelock（环境学家和流行的盖亚假说作者）终于站到了核能这边。当经济自身利益与环境自身利益都指向同一个方向时，事情就可以开始朝着这个方向发展了。目前它们都指向对大

规模无碳能源的需要。核能就是这样一种无碳能源。

尽管核能无法成为彻底的解决方案，但如果能够使公众确信它是安全的，核废物能够被安全处置，以及武器扩散的风险不会由于核能的大幅推广而显著增加，那么核能可以成为解决方案的一个重要组成部分。

## 核能的增长潜力

目前全世界共有约440座反应堆，满足了全球16%的电力需求。其中约350座反应堆在经济合作与发展组织(OECD)成员国，满足了这些国家24%的电力需求。核份额最大的国家是法国，达到了78%。对于环境学家而言，法国应当被看作是世界的典范。法国的二氧化碳排放强度(单位国内生产总值的二氧化碳排放量)是世界上最低的。如果全世界二氧化碳的排放强度都和法国的一样低，那么二氧化碳的排放量将降低50%，全球变暖的速度也将缓慢得多。

由于成本的不确定性以及前面提到的3个潜在问题——安全、废物处置和扩散风险，对核能增长的预测具有不确定性。

**安全：**新一代轻水反应堆已被设计成比老一代更易于运行和维护，并具有更多的非能动安全系统。

由于采用强大的监管和检查系统，核系统安全能够得到保证。没有这种系统，风险将增加。当事故的后果所造成的损害超出了对行业本身的损害时，任何行业都无法让人相信能够自我监管。

**乏燃料处理：**单独看乏燃料这3个主要部分，几乎不会有什么问题。

对于占乏燃料主要部分的铀而言，不存在困难。铀的放射性不足以引起人们的担忧；它所含的铀-235低于天然矿石，所以可作为富集的给料，甚至可以放回其所来源的矿山。

对于在乏燃料中占第二位的裂变碎片部分而言，不存在科学或工程方面的困难。它们中的绝大部分仅须贮存数百年。

建造能够持续必要时间的坚固的安全壳是非常简单的。(如果说埃及人能够建成已持续了6000年的金字塔，我们应当至少也能够做到)。

乏燃料的问题主要来自剩下的1%部分，包括钷和少量锕系元素镆、镅和锔。在这种混合物中，一些成分的毒性高而且半衰期长。

有两种一般方法可用于保护公众免受这种材料的伤害：将这种材料与生物圈隔离数十万年，或者，采用中子轰击销毁这种材料。

对于美国出于防止武器扩散原因而提倡的核燃料“一次通过”式系统而言，隔离是基本原则。但在大力推广核电计划的世界中，我认为一次通过式系统不是切实可行的。

它的问题是公众认识(我将这一课题留给政治家处理)和技术限制的综合影响。第一个技术问题是：乏燃料在贮存最初的1500年左右产生热量，限制可以在最终处置库中存放的材料密度。裂变碎片产生的初期热量并不难处理。钷-241衰变成镆-241，接着继续衰变成镆-237，这一过程是最初的1000年左右时间内的主要热源。对最终处置库岩石的这种热源的允许温升的限制，决定处置库的容量。

第二个技术问题是极长期的辐射。从钷到镆再到镆的这一衰变链使长寿命成分最大化，需要将其与生物圈隔离数十万年。

以美国为例，如果直到本世纪末核能在美国电力需求中继续保持20%的份额，那么采用一次通过式方案的乏燃料将需要9座尤卡山最终处置库的容量。如果美国的反应堆装机容量在本世纪中叶增加到麻省理工学院(MIT)研究报告中所预计的300吉瓦，那么美国将需要每6年或7年就启动一座新的尤卡山最终处置库。这将是一个相当严峻的挑战，因为我们到目前还不能启动第一座最终处置库。要在全世界推广核电，一次通过式循环似乎是不可行的。

一次通过式的替代方案是后处理系统。后处理系统将乏燃料的主要组分分离，然后分别对每个组分进行适当处理，并采取专门措施来处理那些造成长期危险的组分。后处理系统发展最成熟的是法国。法国先从乏燃料中分离出钷，然后将钷与适量的铀混合并制成混合氧化物燃料(MOX)。多余的铀将被送往富集设施。

裂变碎片和少量锕系元素经玻璃固化后，最终放置在处置库中。用于玻璃固化的玻璃在法国拟建的最终处置库的粘土层中似乎具有数十万年的寿期。

混合氧化物燃料与玻璃固化解决了这个问题的一部分但不是全部。下一个问题是怎样处理乏混合氧化物燃料。目前的计划是在快堆投入商业应用以前不对其进行后处理。快堆能够燃烧铀和钚-238混合物，并且理论上也能够燃烧所有少量锕系元素。

可以建立一种持续的再循环计划。在这种再循环计划中，来自乏混合氧化物燃料的铀被用于启动快中子系统，来自快中子系统的乏燃料将接受后处理，所有的铀和少量锕系元素重新被制成新燃料……从理论上说，只有裂变碎片需要送入最终处置库，而且它们仅需要贮存数百年。这在理论上听起来不错，但将其付诸于实践还需要做大量的工作。

**防止扩散：**防止核武器扩散是国际社会的一个重要目标。随着不断扩展的核能计划涉及更多的国家，实现这一目标也变得越来越复杂。在核燃料循环的前端——钚-235富集阶段，以及核燃料循环的后端——乏燃料后处理和处置阶段，存在着转用武器可用材料的一些机会。开展这项工作的地方越多，对其监测就越难。

秘密武器研制计划来源于燃料循环的两端。巴基斯坦和自愿在国际原子能机构监督计划下放弃其核武器的南非都曾利用燃料循环的前端制造核武器。利比亚也曾一直朝这个方向努力，直至最近放弃这种企图。

伊朗的意图还不确定。印度、以色列和朝鲜通过采用重水慢化反应堆的燃料循环后端生产必要的铀，获得了其武器材料。

尽管这些国家的技术发展水平相差很大，但几乎都在设法取得成功。制造核武器的科学原理已是众所周知，相关技术通过内部开发或非法获取似乎也不难掌握。

大家应当认识到，限制国家扩散的惟一办法是利用有约束力的国际协定，其中包括把有效视察作为威慑，以及在威慑失败时进行有效制裁。

身处科技界的我们可以给外交官提供可使根据协定开展的监测更加简单和减少公然侵入性的改进工具。

这些技术保障措施是用于鉴别可能处于最初期阶段的扩散努力的系统的核心。它们必须查出武器可用材料的失窃和转用以及鉴别可用于生产武器用材料的秘密设施。

先进技术保障措施的开发工作最近尚未获得足够的资金。它们的开发需要实施一项国际协调计划。在所有新反应堆、富集厂、后处理设施以及燃料制造厂的设计中，应当将抗扩散和扩散监测技术作为一项必不可少的内容。

目前有一些能在关键场所给出实时结果的技术仍未投入使用。人们等不了太久就会弄清一个富集厂中的钚-235是否在申报的限值范围内。目前正在重新考虑的一个问题是一次通过式循环与各种不同的后处理战略相比的相对抗扩散性。

一组国际专家已经为美国能源部进行一项分析，分析结果已被记录在小组2004年11月的报告“轻水堆燃料的抗扩散性评价”中。专家在这次分析中创建的一套方法是给出核燃料循环的每个阶段的风险评分，然后将这些风险在不同时间的变化加起来。

一次通过式和后处理的所有方案几乎得分相同。在后处理方案中，可获得铀这一阶段增加的风险被富集期间（需要较低的富集度）降低的转用风险、二次燃烧后增加的辐射屏障和用大大降级的材料制造武器的增大难度抵消。

这些得分不应被视为是对扩散风险的准确测量。它们的真正含义是，对聪明人来说，一次通过式与后处理并没有什么不同。

国际原子能机构总干事埃尔巴拉迪和美国总统布什已提议开始认真研究核燃料循环的国际化。在一个国际化方案中，有一些进行富集和后处理的国家。这些国家是供应国。其他国家是用户国。供应国制造核燃料并且回收乏燃料进行后处理，把乏燃料中要被处置的组分与要用于制造新燃料的组分分开。

如果这种方案能得到顺利实施，将使用户国尤其是较小的国家受益匪浅。它们将既不用建设富集设施，也不用处理或处置乏燃料。

对于核电规模小和国内没有适宜地质条件来建造

最终处置库的小国而言，这两者都不经济。作为对这些收益的回报，用户国将放弃从核燃料循环的前端和后端获取武器可用材料的可能。

要实施这种方案，必须建立一种可保证用户国能获得它们需要的燃料的国际体制。这将不容易实现，需要地域和政治上不同的一系列供应国。

降低燃料循环后端的扩散风险甚至更为复杂。但有必要这样做，因为我们已经从朝鲜的实例中看到，如果有材料可供使用，一个国家可以多么迅速地“脱离”国际协定并发展武器。朝鲜通过临时通知便退出《不扩散核武器条约》(NPT)，驱逐原子能机构视察员，并对其宁边反应堆的乏燃料进行后处理，从而在极短的时间内就获得了制造核弹所需要的钚。

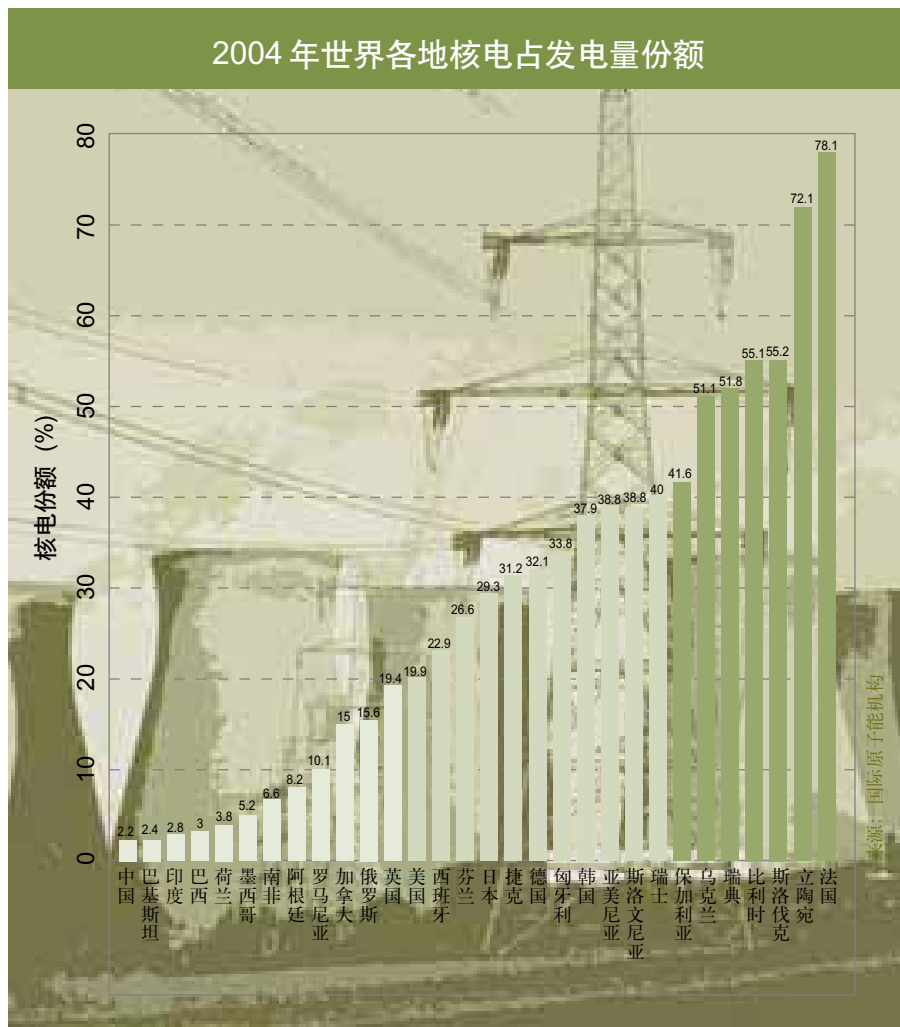
如果没有一种解决废物处置问题的办法，应当收回乏燃料进行处理的供应国就不太可能回收乏燃料进行处理。随着核电的广泛应用，世界各地将有大量的乏燃料产生。上述预测曾预计，超过太瓦(电)的核电装机容量每年能产生2万多吨的乏燃料。

这些乏燃料含有约200吨钚和少数锕系元素以及800吨裂变碎片。如果不能每2年或3年新建一座尤卡山规模的最终处置库，一次通过式燃料循环将不能应对这些乏燃料。后处理加不断回用于快堆可以应对这种情景。仅有裂变碎片须放入最终处置库，而且最终处置库仅需要将它们贮存数百年，而不是数十万年。

总之，在降低化石燃料消耗及其温室气体排放的同时为世界提供经济发展所需能源资源的战略中，核能是一个重要组成部分。要大规模使用核能，将需要自然科技和政治科技的进步。

身处自然科技界的我们能够制造出更好更安全的反应堆，找到处置乏燃料的更好办法以及开发出更好的保障技术。这些工作可以在一种国际环境中通过分

2004年世界各地核电占发电量份额



摊费用和对应当开展的工作取得国际技术共识得到最好的实施。如果参与其中，各国将会对此类发展的成果倍感欣慰。

在自然科技发展能够在一种国际环境下最好地完成的同时，政治科技仅能在国际上进行。原子能机构似乎是启动这项工作的最佳组织，它已初步采取一些小的步骤。我期待未来在这两方面有更大的步骤。

伯顿·里克特任职于斯坦福大学斯坦福线性加速器中心(SLAC)，1984年至1999年曾任该中心主任。他和丁肇中一起“因在发现一种新型重基本粒子方面的开创性工作”而获得1976年度诺贝尔物理学奖。电子邮箱: brichter@slac.stanford.edu。

本文改编自作者2005年9月在国际原子能机构科学论坛上的主旨发言。欲了解更多信息，请访问国际原子能机构网站: www.iaea.org。作者主旨发言中的图表见www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2005/SF\_Presentations05/Session1/BRichter\_IAEA\_Session\_1.pdf。