

Plutonium for Energy?

Explaining the Global Decline of MOX



A Policy Research Project of the
LBJ School of Public Affairs
University of Texas at Austin



NUCLEAR PROLIFERATION
PREVENTION PROJECT

 The University of Texas at Austin

Edited by Alan J. Kuperman

钚的回收使用：哪里出了错？

Alan J. Kuperman

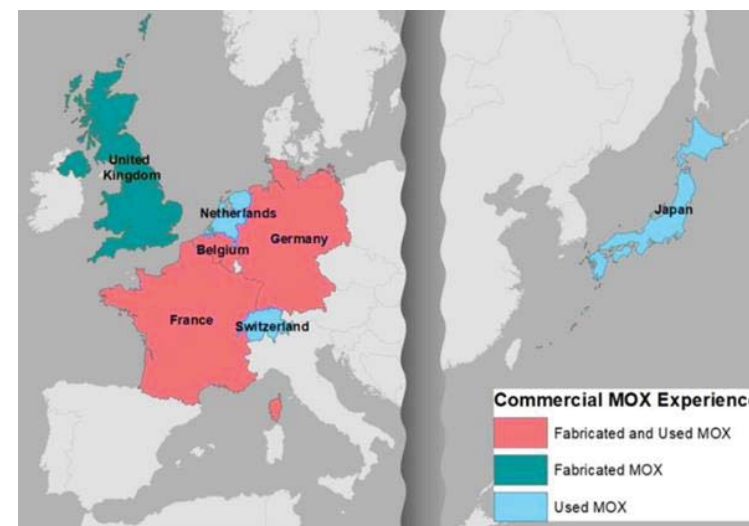
这章导论概括了这本书的研究发现。这本书是第一次对全球范围内“钚提供能源”这一课题的全面研究。“钚提供能源”，即在传统使用铀燃料的热核反应堆中使用混合氧化物燃料（MOX）。钚是一种人造的元素，可以通过对乏燃料进行后处理而获取。钚因为三种原因饱受争议：致癌，可能被用于核武器，和昂贵的净化和生产费用。我们的团队在七个国家展开研究，这些国家或是已经进行钚燃料的商业化生产，或是使用钚铀混合氧化物燃料（thermal MOX），包括比利时、法国、德国、日本、荷兰、瑞士和英国。我们发现这一产业正在迅速衰落，七个国家中的五个已经决定不再展开商业性的混合氧化物燃料活动。这一决定并非因为钚燃料早期的性能问题，那些难题已经被攻破，而是因为钚内在的危险。因为钚有毒，混合氧化物燃料的生产商面对公众的反对，不得不采取特别的预防措施，导致成本增加、产出减少。世界上有六个商业性生产钚铀混合氧化物燃料的国家，因为运作不佳，其中五个国家已经永久地关闭了生产设施。在六个将钚铀混合氧化物燃料用于商业用途的国家，该燃料的价格比传统的铀燃料高出3到9倍。出于对环境和核扩散的担忧，钚燃料在四个国家带来政治上的争议，包括德国、日本、比利时和瑞士。这些国家在允许继续发展核能源的同时，叫停了部分或全部的混合氧化物燃料的生产活动。安全保卫也是一个主要的担忧，每一次运送的新产出的混合氧化物燃料中均含有钚，足够用来制造几十个核武器，反应堆运营商并没有大量加强核物质的保护，集装箱可能遭受恐怖分子的袭击。具有反讽意味的是，钚燃料起初被视为对核工业至关重要，现在它却反过来削弱了核能源产业的经济、安全和受欢迎度。这一章总结了几点经验教训，供那些参与、或是正在考虑参与通过回收利用钚来生产核能源的国家参考。

回收使用通常被认为是一件好事。它化废为宝，从而减少对原材料和废物处理的需求。不过，将已经使用过的核燃料中的铀回收使用、产生用于制造核能源的新燃料却被证实充满了争议。这主要是因为铀有三大缺点：它能致癌，可能被用于制造核武器，以及因为上述两个原因导致的高额的净化和制造燃料的费用。尽管有这些挑战，七个国家，包括比利时、法国、德国、日本、荷兰、瑞士和英国，已经在传统的热核电站从事铀的商业性循环利用，以期获取能源（热核电站用“热”中子而非“快”中子实现裂变）。这些国家通过制造和使用、制造或使用混合氧化物燃料来替代传统的低浓铀（LEU），混合氧化物燃料将铀和钍结合在一起。此外，其他国家，包括中国、印度、日本、俄罗斯、韩国和美国，正在探索新的国内设施、使用热反应堆或是快反应堆对铀回收使用，以期创造能源。鉴于其巨大的潜在后果——包括国际安全、公共健康、和核能源的财务可行性——做这样的决定应该对铀钍混合氧化物燃料在全球的历史性经验有一个全面的分析。遗憾的是，直到现在，这样的资源尚未存在。¹

这本书是第一次对所有七个以核能生产为目的、在热核反应堆商业性回收使用铀的国家的研究（图例 1）。我们在每一个国家都展开了田野调查。这些国家中有三个从事混合氧化物燃料的商业性生产和使用，包括比利时、法国和德国；三个已经商业性使用但尚未生产混合氧化物燃料，包括日本、荷兰和瑞士。有一个国家已经商业性生产但尚未使用混合氧化物燃料，即英国。

图例 1

七个国家均从事了用于热反应堆的商用混合氧化物燃料



资料来源：Yeo-Ri Kim

我们研究中的一个主要发现是铀钍混合氧化物燃料的产业正在快速地衰落。截止 2018 年，七个国家中的五个已经终结、或是决定淘汰混合氧化物燃料的商业活动（表格 1）。比利时在 2006 年中止了混合氧化物燃料的生产和使用。瑞士在 2007 年结束了混合氧化物燃料的使用。英国于 2011 年终止了商业性混合氧化物燃料的生产。德国于 1991 年中止了混合氧化物燃料的生产，2017 年插入最后一组混合氧化物燃料组件，意味着放射过程将于 2020 年结束。荷兰计划在 2026 年加载最后一组混合氧化物燃料组件，并在四年后撤除。除了最后这一个例子，

各个国家在做出决定淘汰核能之前都已经减少了商业性混合氧化物的活动。这一记录目前只剩两个国家仍计划继续在热反应堆商业性生产混合氧化物燃料，即法国和日本。这两个国家的项目同样面临着财务和政治上的挑战。

为了评估造成混合氧化物燃料产业整体衰落的原因，及其在不同国家产生的不同后果，这本书考查每个国家与钚铀混合氧化物经验相关的五个方面，包括经济、安全保障、健康与环境，业绩，和公众接受度。此前公开的文献中包含和这些问题相关的一些信息，但通常陈旧而且不完整。很多情况下，我们的研究人员通过采访当前或是已经退休的官员来获得关键数据，这些官员来自政府部门、公共事业机构、工业和非政府组织（NGO）。他们提供了口头和文件证据。在完成各章的初稿后，我们额外征求专家意见，然后才修正出版。

图表 1 用于热核反应堆的商用混合氧化物燃料的衰落

国家	是否生产混合氧化物燃料？	是否使用混合氧化物燃料？
比利时	✘	✘
法国	✓	✓
德国	✘	↘
日本		✓
荷兰		↘
瑞士		✘
英国	✘	

图例:

✘= 已经结束

↘= 逐步淘汰

✓= 继续进行

被误解的必要性

通过回收使用钚来生产能源的想法确立于二十世纪六十年代，基于两个错误的观念：全球可用于燃料的铀储备稀缺，及未来对核能源的需求将成倍增长。当时理解的解决方案是，通过将铀的主要同位素铀 238 (U-238) 转化为产生能源的钚同位素钚 239 (Pu-239) 来增加铀产生的能量，因为铀 238 在慢中子的热反应堆无法“裂变”而产生核电。由于 99%的铀是无法裂变的同位素，这样的转化能极大地增加全球铀供应中可能产生的能量。当传统的低浓铀燃料在核电反应堆里放射，少量的铀 238 被转化为钚，这些钚在核燃料后处理工厂中被分离出来，就可用于制造新的燃料。

为了将足量的铀 238 转化为钚，需要发展快中子增殖反应堆 (FBRs)。轻水反应堆依赖于低能量的慢中子，相比之下，快中子增殖反应堆有更多的高能量快中子。上世纪七十年代，核电厂开始商业性回收使用它们使用过的铀燃料，分离出钚，为快中子增殖反应堆提供燃料。可是，快中子增殖反应堆的商业化被推迟了。于是，这些核电厂一方面大量储存为轻水反应堆准备的混合氧化物燃料，另一方面开始对其中一小部分的钚进行循环利用。²

到了二十世纪，世界上大多数的快中子增殖反应堆的发展均告失败。诸多核能设施意识到，如果他们对乏燃料进行后处理，唯一的对钚进行商业化回收使用的方法是为轻水反应堆生产混合氧化物燃料。在大多数拥有核能力的国家，核设施选

择不从事这样的循环使用。相反，他们倾向于将乏燃料作为废料处理，尤其是二十世纪七十年以后人们发现全球的铀储备比此前想象的多很多，而对核能源的需求比此前想象的少很多。从 1976 年开始，由于担心分离出来的钚可能增加核扩散和核恐怖主义的风险，美国开始在全球范围内劝阻乏燃料的后处理。³ 尽管如此，这本书考察的七个国家还是启动了钚铀混合氧化物燃料的商业化。

用于热核反应堆的混合氧化物燃料在此后的衰落，和该燃料在性能方面的问题并没有太大关系。起初，混合氧化物在热反应堆中确实面临一些技术上的挑战。制造厂无法均匀搅拌氧化物，导致钚在燃料颗粒中结块，造成放射过程中的高热点，释放出过高的放裂气体，护套失败，由此对反应堆中作为冷却剂和减速剂的水带来核辐射污染。

此外，钚有更明显的倾向既吸收热中子，又被热中子所裂变，带来的结果是一个削弱的中子能谱，降低了“有毒物质”（它们被用于控制过多的裂变）的效能，使反应堆设备遭遇大量的有害快中子。一个与此相关的问题是，在毗邻的混合氧化物和低浓铀燃料组件之间出现的中子通量梯度，这使炉心运营复杂化，不得不在单一炉心的混合氧化物燃料中使用几种不同百分比的钚。相较于传统的低浓铀（LEU）燃料，混合氧化物燃料有更低的燃耗率，使同一反应堆的炉心必须展开两次不同的核燃料循环。另一个问题是，和铀的裂变相比，钚的裂变产生了较少的缓发中子，因此需要对反应堆控制系统进行修改。尽管如此，这些潜在的问题最终都得到了解决，如今混合氧化

物燃料的运作基本和低浓铀相似。虽然技术上取得了如此成功，混合氧化物产业却因为钚的三个隐患而快速地衰落。这三个隐患分别是癌症、核武器、和高成本，它们阻碍了混合氧化物燃料的生产和使用。

生产钚铀混合氧化物燃料

六个曾经商业性经营混合氧化物燃料的生产设施有五个已经永久性关闭。在关闭以前，它们中大多数产能低下。第七个设施在建成后被取消。导致这一糟糕业绩的主要潜在原因是，钚比铀更加危险，由此产生高额的成本和公众的反对。钚的大部分是由寿命相当长的同位素组成，这些同位素大量释放阿尔法辐射。钚的一个同位素相对快速地衰变为镅 241，镅 241 本身释放强烈的阿尔法辐射。在体外，这些阿尔法辐射并不是一个主要的问题，因为很多物质都可以阻挡它，包括人的皮肤。但是，如果把它吸入体内并停留在肺里，阿尔法粒子会出现突变，并经钚的这些同位素和镅的诱导，持续轰击周围的细胞组织。辐射防护物理学家相信这将最终导致癌症。

这一危险尤其出现在混合氧化物燃料的生产中，当钚呈现为氧化的形态，可能被吸入人体。在那些钚呈现为金属形态的燃料循环设施，加工过程还有额外的危险：钚可能着火或是产生气态的胶体被人体吸收。为了降低工作人员和周边居民的健康风险，混合氧化物工厂采用昂贵的硬件设备，包括空气过滤器，手套箱（glove boxes），和自动装备，以及高成本的生产

程序，比如长时间关闭工厂来清理溢出来的物质。同生产低浓铀燃料相比，这些设备和举措大大提高了生产混合氧化物燃料的成本。即使将获取铀的客观的花费排除在外，生产铀铀混合氧化物燃料也比生产低浓铀燃料高出三分之一或是更多。一些公司试图降低这些花费，有时在防护措施上偷工减料，结果导致事故频发、激起义愤、带来丑闻、公众示威等，由此减少了产出、增加了成本。

最大的失败是英国核燃料有限公司的塞拉斐尔德（Sellafield）混合氧化物工厂（SMP）。该厂原计划每年产出 120 吨（MTHM/yr）的重金属。事实上，从 2001 至 2011 年经营期间，它总共只生产了 14 吨燃料，平均每年差不多 1 吨，大约只是计划产出的 1%（详情见第四章）。造成这一深刻失败的两个主要原因来自铀的安全隐患：未经证实的自动设备（它们用于减少工人暴露于辐射），和过小的厂房面积（保护工人而采取的措施带来额外的费用，缩小厂房面积是为了降低这些费用）。这么做的后果是设备无法运作、昂贵的维修费用、和延长的停产时间。虽然塞拉斐尔德混合氧化物工厂的麻烦可以归咎于尚处于实验性阶段的技术和粗劣的设计，但该工厂在这两方面的做法最终都是因为铀对人体健康的威胁，及为了减轻这一威胁而提升的成本。

英国核燃料有限公司（BNFL）此前有一个小规模的商业性工厂，即混合氧化物燃料示范设施。虽然规模比较小，但它同样以失败告终。该工厂的产能是每年 8 吨的重金属。从 1993 至 1999 年，它一共生产了 20 吨，也就是平均每年 3 吨多一点，

大约是产能的 40%。但是，这个厂的工人反复对质量控制的数据进行造假，当这一消息被揭露后，该工厂被永久性关闭。造假引发了一个国际性丑闻，该工厂被施以 1 亿美元的罚款，日本也将未经辐照的混合氧化物组件退回。虽然我们无法知晓英国核燃料有限公司为何一直无法监控产品的质量，但有一个可能是，就像塞拉斐尔德混合氧化物工厂的例子一样，铀带来的健康隐患产生了高额的费用，而英国核燃料有限公司试图减少这一费用。

德国的奥肯哈诺（Alkem Hanau）工厂始终处于低产能状态，直至 1991 年因为一次辐射事故而永久关闭（见第六章）。该工厂的潜在产出是每年 25 吨重金属，不过，从 1972 年到 1991 年，它每年平均生产 8 吨重金属，大约是计划产能的 30%。这一差额部分源于铀的毒性带来的复杂情况，包括“在困难的手套箱条件下展开维护工作”和“生产区域的铀污染需要大量时间来清理。”因为欧洲原子能协会（EURATOM）繁复的安全检查，及德国国内因为运输安全的争议，铀的武器危险也阻碍了生产。1991 年，核电厂的一个工人在一次手套箱事故中遭受核污染，随之而来的公众义愤导致该工厂被永久性关闭。类似的争议也阻止了哈诺 1 号（Hanau 1）的开业，它是一间配套工厂。哈诺 1 号几近完工，但最终在 1995 年被取消。

比利时的 P0 核电厂由地处德赛尔（Dessel）的 Belgo-nucléaire 公司经营。尽管它相对成功，但最终仍旧因为低效、激烈的竞争、和全球范围内对混合氧化物逐渐缩减的需求而永久关闭（见第二章）。该核电厂的产能是每年生产 32 吨用于混

合氧化物燃料棒的重金属。这些重金属被运至邻近一个 FBFC 所属的设施和燃料组件混合在一起。从 1973 年到 2006 年，P0 核电厂生产了大约 600 吨的燃料棒，即平均每年 18 吨的重金属，是计划产能的 55%。不过，为解决钚对健康的威胁，导致生产成本很高。最终，P0 无法和法国的更高效的 MELOX 设施竞争。特别是随着市场需求减少，比利时的核电厂因为经济原因而关闭，这些原因根源于钚燃料的危险和不受欢迎。与此同时，九十年代中期，在相邻的一座 FBFC 设施中的一组燃料棒受损，迫使该设施关闭了混合氧化物和铀的运作，并在随后展开一次耗资巨大的排污净化，及新建一座昂贵的附属建筑物，仅供混合氧化物组件使用。

相比而言，法国的钚铀混合氧化物燃料生产更成功。法国的生产在两个连续的设施中展开，不过这两个生产设施同样面临经济和安全方面的挑战（见第三章）。地处卡达拉舍（Cadaraache）的 ATPu 核电厂于 1989 年开始商业性生产。它的产能从每年生产 20 吨用于制造混合氧化物燃料棒的重金属逐渐升至每年 40 吨，并与位于比利时或是法国的核电厂的组件合并。1995 年，由于地震的风险，法国核安全机构规定该核电厂在“2000 年后旋即”停止运营。此后，该厂在 2003 年停止运营。法国顾虑的危险包括地震可能引发的钚火，临界事故，或是其他放射性物质的释放。因此，这个混合氧化物工厂的永久性关闭同样可部分归咎于钚的核安全及武器方面的风险。

目前为止最成功的钚铀混合氧化物的工厂是法国的 MELOX，它也是唯一一个仍在运营的商业性生产设施。这个核

电厂的初始设计是每年生产 250 吨用于制造混合氧化物燃料棒的重金属，但从未被批准生产超过每年 195 吨。它实际上生产的就更少了。从 2014 到 2017 年的四年间，MELOX 平均每年生产低于 125 吨的重金属，比它初始设计的产能的一半还低。如此锐减的产出源于大幅缩减的国外需求：自 2015 年起，德国零需求。近年来，日本和荷兰联合起来也不过大约每年 10 吨。同时，由于高成本，法国国内的公共事业部门拒绝增加它们使用混合氧化物燃料的用量。2017 年，MELOX 的报告提及一些“生产上的技术困难，”或许可以解释为何它的产出缩减至 110 吨。

热反应堆中的混合氧化物燃料

所有六个已经在热反应堆中商业性使用混合氧化物燃料的国家都发现，混合氧化物燃料的价格是传统的低浓铀燃料的很多倍。主要的原因是增加的燃料生产成本，尤其因为钚对健康的威胁。还有其他因素，包括小批量的生产、均匀地混合两种氧化物的难题，和提升运输中的安全保障。对成本影响最大的，是和生产燃料棒相关的活动。比利时核工业中致力于混合氧化燃料的官员曾写过一篇文章，其中提到，比起低浓铀燃料的生产来说，“生产混合氧化物燃料，所有活动加起来的成本通常高 15 到 25 倍。”⁴

另外一个可观的花费，是通过对低浓铀的乏燃料进行后处理来获取混合氧化物的关键成分：钚。⁵ 不过，这一过程对混合

氧化物燃料制造成本有多大影响，取决于计算的程序。通常，核工业将后处理认定为废物处理，由此分离出的钚被视为生产新鲜燃料的免费成分。事实上，在核工业市场上，钚其实有着可观的负价值，钚的所有者必须支付高价请人接收钚（见第八章）。有两个因素可以解释这一现象：第一，钚实质上没有市场需求，一部分的原因是混合氧化物燃料高额的制造费用；第二，可替代的处置途径也很昂贵：由于钚的毒性和安全隐患，将未经辐照的钚作为废物处置费用很高。⁶ 一般来说，混合氧化物燃料的另一个主要给料是贫化铀。作为浓缩铀的废弃产品，贫化铀数量丰富，因此价格低廉。由此，核工业普遍的认知是，混合氧化物燃料的重金属给料基本免费，与生产低浓铀燃料正相反——天然铀和浓缩过程耗资相当可观。如果因为这样的认知而无视后处理过程中获取钚的高额费用，那么混合氧化物燃料在生产价格上的劣势就不会那么令人震惊。

尽管如此，每一个使用过混合氧化物燃料的国家都证实混合氧化物燃料比低浓铀燃料贵得多。根据新闻报道，近几年日本的公共事业机构为进口混合氧化物燃料支付了至少 9 倍于等量低浓铀燃料的费用。⁷ 根据日本原子能委员会的报告，如果日本按计划继续发展国内的核燃料循环设施，钚铀混合氧化物燃料将耗资更多，可能会是低浓铀燃料的 12 倍。⁸ 在比利时，一份 1998 年的核工业研究发现，即使不考虑生产混合氧化物所需的物质给料的花费，而在计算低浓铀燃料的生产终加入这一花费，生产混合氧化物燃料的成本至少是低浓铀燃料的 5 倍。⁹ 在德国，根据来自政府、核工业、和公民社会的专家的研究，

生产混合氧化物燃料的成本是低浓铀燃料的 3 到 5 倍。¹⁰ 在荷兰，一份 2010 年递交的公共事业许可——该许可是用来着手混合氧化物燃料的商业性使用——将混合氧化物燃料的制造成本描述为制造低浓铀燃料的 5 倍。¹¹ 英国能源部在 1979 年的估算是，就热反应堆燃料的制造成本来说，混合氧化物是铀的 4 倍。¹² 在瑞士，公共事业机构过去为混合氧化物燃料所支付的费用是当前低浓铀燃料价格的 6 倍之多，这个估算已经将通货膨胀因素考虑进去。¹³

尽管法国实施的是规模经济，根据核工业和其他受访者提供的信息，¹⁴ 制造混合氧化物燃料的成本仍是低浓铀燃料的 4 至 5 倍，一部分的原因是因为 MELOX 核电厂始终在低于计划产能运营。¹⁵ 2000 年的一份法国政府报告表明，生产混合氧化物燃料的总成本，是生产低浓铀燃料的 4.8 倍，这个总成本包含了通过后处理的方式获取钚的费用。¹⁶ 随着后处理和混合氧化物制造设施中吞吐量的下降，每一单位的生产成本提高，混合氧化物燃料在成本上的劣势可能在近年加剧。

混合氧化物燃料的支持者将这些额外的费用轻描淡写为生产核能源中微不足道的花费。核电厂的建造在核能源的生产中占首要地位。¹⁷ 在分期偿还付清此类建造之前，低浓铀燃料的前端费用估计只是能源生产总成本的 5% 到 10%。混合氧化物燃料被引进之后，它通常替代核芯中三分之一的低浓铀。如果混合氧化物燃料的价格是低浓铀价格的 5 倍，那么引进混合氧化物则将前端燃料费用提升了 133%，不过总成本却只增加了 7% 到 13%。此外，这些费用在过去都由产业的监管者转嫁

给了地税纳税人，因此公共事业机构只支付很少的费用或是根本不用支付。

不过，分期偿还完核电厂建造的费用之后，混合氧化物燃料带来的额外花费开始变得显著得多，特别是考虑到现代电力市场的放松管制。当一个核电厂完全还清了分期款项，一个由低浓铀供给燃料的核芯所需的费用可能提高至总成本的约30%。如果混合氧化物替代了该核芯三分之一的燃料供给，那么所需的费用是低浓铀的5倍，核能源生产的总成本也会明显增加，高达40%。在放松管制的电力市场，消费者有多种选择，因此不会被迫去支付这些增加的成本，这意味着电力公司将面临利润减少，甚至是失去利润。核工业中普遍放弃在铀钍混合氧化物中回收铀的做法，和旧有核电厂完全偿清建造费用及电力市场的放松管制几乎同时发生。

启动混合氧化燃料的公共事业机构在当时鲜有别的选择。尽管如此，它们仍旧对混合氧化物有所担忧，包括成本、安全、运营上的困难、管制机构的批准，和对乏混合氧化物的处理（从长远来看，相比乏低浓铀，乏混合氧化物释放出更多的热和放射性物质）。在上世纪七十年代，当公共事业机构最初决定启动混合氧化燃料，它们的国家通常缺乏法律或是物流上的规定来监管过渡期乏燃料的储存。因此，后处理被视为是避免反应堆仓促关闭的唯一办法。通过后处理将铀分离之后，这些公共事业机构将铀在混合氧化物中的回收使用视为唯一可行的处置途径。因此，尽管存有疑虑，很多核设施还是启动了混合氧化物燃料。

比核能源更有争议

混合氧化物的衰落不纯粹是个经济现象，也并非附属于更广范围内的全球对核能的降温。由于铀在安全和武器制成上的威胁，回收乏燃料已经被反复证明没有像传统的、一次性使用铀燃料那么受欢迎。在德国，上世纪九十年代，当人们开始专注与铀的循环密切相关的国际运输给环境和核扩散带来的风险，反核抗议活动不断升级，特别是为后处理而出口乏燃料、以及进口高强度放射性废物。大众的义愤刺激德国在2002年通过一项法律，禁止在2005年后继续出口用于后处理的乏燃料，并规定到2021年逐渐淘汰核能（见第六章）。具有讽刺意味的是，铀的回收使用起初被认为是维持发展核能所必须的，而事实上却损害了核能的发展。

同样的在日本，对国内民众和国际观察者来说，由于对健康和安全的顾虑，铀的回收使用本身比核能更有争议（见第五章）。以安全问题为基础，日本的反核非政府组织在1999年成功地说服政府拒绝并退回了已经为高滨-4号反应堆进口的混合氧化物燃料。不过，他们当时无法将核电站关闭或是阻止它在2011年福岛灾难之后的重新开放。2001年，仍旧以安全为主要原因，日本选民阻止了在柏崎刈羽-3号反应堆使用混合氧化物燃料，尽管他们允许该核电厂使用低浓铀燃料继续运营。同样在2001年，一个地方官员出于对安全的顾虑，撤回了最初允许福岛核电厂使用混合氧化物燃料的同意书。这三次对铀回收使用的反对导致混合氧化物的商业性使用在日本被延迟了

10 年。日本的钚储备因此剧增，现在已经超过了 47 吨。日本国内钚的囤积足以制造出五千个核武器。¹⁸ 日本的邻国，包括中国、韩国和朝鲜，均表达了对核安全的担忧。

其他国家也一样，钚的回收使用比传统的核能更有争议。在瑞士，2003 年的一次全民公投中止了进口用于后处理的乏燃料，该决议从 2006 年开始生效。不过，瑞士选民一再反对关闭核反应堆，直到日本福岛的灾难，2017 年的一次投票才决定在 2050 年前后淘汰核能（见第七章）。在比利时，上世纪九十年代，非政府组织将反核运动聚焦于与钚相关的核扩散、恐怖主义、及对环境带来的风险。这些努力迫使比利时政府在 1993 年中止签订新的后处理合同，并且开始重新评估混合氧化物燃料，最终在 1998 年终止了最后一个现存的后处理合同（见第二章）。比利时副首相在 1998 年解释，以现有的“有关经济和生态方面的信息为基础，我们没有理由再使用后处理技术。”¹⁹ 这一言论的发表早于政府在 2003 年的决定，这一决定以 2025 年为目标将核能完全淘汰。

只有两个国家，法国和荷兰，到目前为止在热反应堆中回收使用钚没有引发决定性的公众反对。在法国，产业和政府间的有力联盟阻挡了绿色和平组织和绿党的反对，这些组织强调后处理的风险和钚在运输中的安全隐患（见第三章）。²⁰ 在荷兰，唯一的核能反应堆和核废物设施地处荷兰的西南，沿着和比利时的边界，这也是从法国的后处理设施和混合氧化物核电厂往来运输的线路，远离荷兰本土，少有荷兰居民因为钚的回收使用而受到进、出口的影响。此外，荷兰核能设施仅签署

了一份合同，计划使用混合氧化物十三年。这一明确的年限让荷兰国内的民间反核组织和政客们无从发动公众去发对可能的续约，尽管反对续约在其他国家是一个有效的办法。法国和荷兰的经验表明，如果国内有很强的利益支持、或是由于有限的发展而避免了公众的审查，钚的回收使用在政治上很可能成功。

安全风险

这本书也对新鲜的混合氧化物燃料的实体安全性表示担忧。新鲜的混合氧化物燃料含有钚，可以用来制造核武器。虽然核电厂的一些安全程序是秘密的，我们的案例研究显示，当混合氧化物燃料被引进后，对核反应堆的实体保护并没有明显加强。核电厂确实试着将新鲜的混合氧化物的储存时间最短化，它一送到就马上卸载进入反应堆。它不像新鲜的低浓铀燃料，后者可以长时间存放，以防止燃料供应的中断。反应堆的运营商也调整工人的安全防护程序，以应对钚更高的放射性。除此之外，相比新鲜的低浓铀，或是低浓铀的乏燃料，反应堆的运营商遵循国际安全保障要求，更频繁地监控和检查新鲜的混合氧化物，以防止潜在的改变其用途的可能。有些运营商也提到，因为新鲜的混合氧化物燃料含有钚，在防护上，他们比对新鲜的低浓铀燃料更严格，或是采用和防护低浓铀的乏燃料一样的水准，因为后者也含有钚。

所有这些举措都没有充分应对来自恐怖分子或是罪犯的威胁。相比低浓铀的乏燃料，新鲜的混合氧化物对区域安全带

来更大的威胁。它没有强放射性，盗贼因此心无所惧，意图对它进行处理来获取制造核武器的钚。反应堆的运营商和政府官员似乎都认为，一大堆的新鲜混合氧化物燃料的组件（有成百上千公斤重），被储存于反应堆池中或是地窖里，足以阻止盗贼行窃。他们似乎并没有把这些未经照射的钚当做可用来制造核武器的材料保护。一旦遭遇事先筹划的恐怖主义袭击，后果将是灾难性的。

新鲜混合氧化燃料的地面运输时常跨越成百上千英里，由此被施以额外的安全保护。但是，这些额外的安全措施通常限于一辆装甲货车，由几辆公安部的警车护送，通过无线电通信和一个中央指挥部保持联系。如果遭遇武装恐怖分子使用他们过去曾经用过的武器袭击——这些武器包括成形炸药、穿甲弹药、火箭助推榴弹炮——所运载的混合氧化物燃料很有可能被入侵和盗窃。混合氧化物燃料的运输车队采用固定、可预测的路线，燃料因此更容易遭受攻击。这些路线常包括一些交通阻塞点和停车点，很可能为恐怖分子袭击创造理想机会。²¹ 一个用于压水反应堆的单一混合氧化物燃料组件通常含有超过 30 公斤的钚，足够用来制造至少三个核武器。此外，每一个混合氧化物的集装箱可能包括 12 个或是更多的用来重启反应堆的组件。在法国，类似结构的混合氧化物运输每周一次。另一个运输中的弱点与新近发展的综合核设施有关，运送混合氧化物燃料棒到其他的核电厂，然后在那里将它们组装为燃料组件（见第二章和第三章）。

在法国，更危险的是将分离出的二氧化钚从后处理工厂

运送到混合氧化物生产地点：每一个集装箱含有多达 250 公斤的钚，足以用来制造至少 24 个核武器。²² 这些集装箱每周运送两次，每次途经 600 英里。法国后处理工厂和混合氧化物工厂的保卫也受到质疑。这两个工厂各自含有成吨的已分离出的钚，足够用来制造成百上千个核武器。奥兰诺（Orano）是燃料再生公司的总经理，他在 2018 年证实，如果公司用于安全保卫的费用翻倍，只会让法国电价增加 0.2%。²³ 恐怖分子如果盗窃可用于制造核武器的钚，将带来巨大的潜在后果。鉴于这一点，为增加安全保卫的投资应该是明智的。

引人注目的是，有些外国政府和核工业的官员仍然声称反应堆级的钚不能被用于制造核武器，尽管这一神话在过去几十年已经被戳穿很多次。日本派往联合国裁军大会的前大使今井隆吉（Ryukichi Imai）在 1993 年宣称，“反应堆级别的钚……不太适合用来制造炸弹。”²⁴ 比利时官员也表达了类似的看法（见第二章）。在法国，一份 2017 年 10 月发表的政府报告称，“在混合氧化物燃料中使用钚使得……所剩的钚的同位素组成极大地降低，因此这项技术不是核扩散技术。”²⁵

这些说法似乎将轻水反应堆（LWRs）和核武器混为一谈：轻水反应堆依赖于热中子的裂变，因此只有特定同位素的钚才能持续一个链反应；而核武器依赖于快中子，所有的同位素的钚都能持续一个链反应。任何同位素组成的反应堆级的钚都能被用来制造核武器，很多政府和独立专家已经反复记录了这一点。²⁶ 这一类钚的关键固体快状物仍然很小；通过推迟核芯的插入，或是使用一个悬浮的内核、或是用耐热炸药来实现内向

爆炸，均可以处理或导出额外产生的热；通过更快的组件或是加入氘，可以解决过早启动的问题。我们要感谢瑞士的受访者，他们透露瑞士政府和军队支持乏燃料的回收使用，其中一部分的原因是为了将来建造核武器创造条件，也就是说，他们含蓄地承认了反应堆级的钚具有可被用来制造核武器的风险（见第七章）。

给东亚及其他地区的经验教训

这本书为至少三组国家提供相关的经验、教训。第一组是两个国家：法国和日本，它们计划继续长期在热反应堆中商业性使用混合氧化物燃料。第二组是三个国家：中国、英国、和美国，它们正在考虑在热反应堆中开始大规模使用混合氧化物燃料，不过美国的计划是处理核武器生产遗留下的钚。第三组是其他国家，包括印度、韩国、俄罗斯和中国，这些国家追求用可替代的技术回收使用乏燃料，比如快反应堆和高温处理。这些替代技术可能同样引起人们对钚的毒性、生成武器的杀伤力，和有关花费的担忧。

本书的第一个经验是，为了解决钚在燃料再生设施中对安全和健康的威胁，导致高额成本，回收使用乏燃料以获得能源的费用因此极度昂贵。第二，即便是回收使用钚看上去能带来的效益，包括能源安全和废物管理，比起需要支付的巨大成本，都太微小。根据近来的权威研究，这一效益与成本的失衡不仅适用于热反应堆中的混合氧化物，也同样适用于其他可替

代技术，包括快反应堆。²⁷ 第三，面对以下几个顾虑，在回收使用乏燃料过程中采取的安全措施还很不充分：反应堆级的钚可用于制造核武器的性能、几个恐怖主义组织已经声称要获取并使用核武器，和这些恐怖主义组织显示出的施展精密攻击的能力，就像他们在 911 恐怖袭击中所做的。第四，考虑到全世界供应丰富的铀和浓缩铀，为生产持续的、充分的核能源而进行乏燃料的回收使用实在没有必要。由此，因为回收使用钚而产生的可观的经济、安全保卫、和健康安全方面的危险也没有必要。第五，有些国家不顾高成本和补偿性收益的缺乏而继续追求钚燃料，很可能被其他国家认为藏有不可告人的意图，由此损害国际和平与安全。

由这些经验衍生出对上述三组国家特定的建议。法国和日本目前正在计划延续使用不经济、并带有风险的钚铀混合氧化物。我们认为，它们应该在国内政治允许的情况下，尽快将混合氧化物淘汰。法国的政府和工业对钚的支持强大有力，并且根深蒂固。不过，法国国家公共事业机构已经认识到回收使用钚会提高电力的成本。这可以用来解释为什么法国没有增加混合氧化物燃料的使用，虽然法国国内在四个必要条件上均有富余：它有已分离出的钚、后处理产能、混合氧化物制造能力、及使用混合氧化物的反应堆的产能。即便对人员安全和场地保卫方面的顾虑不足以迫使法国重新评估它的混合氧化物项目，该项目在经济上的劣势有可能最终会对这一问题做出判断。

日本在促进钚的游说上可能没有像法国那么强大，因为日本尚未开始商业性运营后处理和混合氧化物的制造设施。相

反的，回收使用问题上最大的压力可能来自地方社团。这些团体与核反应堆及尚未完成的后处理和混合氧化物核电厂相邻，他们害怕无法摆脱乏核燃料。为解决这一顾虑，日本政府应该投资扩充乏燃料的干式储存桶，同时向这些团体解释这种技术的安全性和可靠性，并在地质处置场完成之前，对这些团体作为临时核废物储存点进行补偿。日本政府也应该将它可观的后处理资金的一部分支付给英国，让后者拥有 22 吨的钚并将它留在本国，由此将日本的钚的储量削减近一半。既然日本国内的钚的大部分目前不能用于反应堆，政府应该和美国合作，把那些材料当做废料处理，美国也有一个类似的处理项目。²⁸ 日本由此剩下的钚——2 吨在国内，15.5 吨在法国——应该比较快地处置为混合氧化物和废料的混合物。这样日本就能在短短五年内清除它的钚的储存量。²⁹

中国、英国、和美国三个国家正在考虑开始在热反应堆中大规模使用混合氧化物。它们应该退一步意识到这个选择既不经济也没有必要。美国浪费了数十亿美元在一座只有部分建成、成本飙升的混合氧化物制造厂。在这之后，美国政府看起来已经做出一个决定，现在计划将制造核武器余下的钚作为废物处理。³⁰ 英国对乏燃料的后处理已经进行了超过半个世纪，但是因为经济和其他原因，从未在反应堆里对剩下的钚进行商业性回收使用（见第四章）。后果是英国国内目前有多达 110 吨的已分离的民用钚，使该国核武器中含有的 3.2 吨钚相形见绌。虽然英国国内尚没有一个混合氧化物制造厂，也没有已经得到授权可以使用混合氧化物的反应堆，但官方的立场是政府

倾向于将这一民用钚在混合氧化物燃料中回收使用。英国应该结束这一不实际的想法，将钚作为废物处理。³¹ 在这三个国家中，中国目前处于最好的状态，因为它尚未产生多余的已分离的钚，而且它正在和奥兰诺（Orano）进行谈判，将在中国建造用于后处理和生产混合氧化物的厂。尽管中国已经成功地效仿了西方的工业化，考虑到钚铀混合氧化物在西方已经被证明是一个耗资巨大且危险的错误，中国若在钚的问题上也效仿西方将是不明智的。

最后是那些通过使用可替代技术、正在追求钚的回收使用以期获取能源的国家，比如印度、韩国、俄罗斯和中国。从理论上说，快反应堆能在燃料中消耗更多的钚和其他的锕系元素，因此减少长期的热度和高强度放射性废物的放射性。和传统的后处理相比，高温处理能够避免分离纯钚，因此，从某种程度上减少了一个密封的燃料循环所带来的核恐怖主义的风险。不过，学者们已经证明这些所谓的益处是被极大地夸大了。³² 这些技术无法克服钚的三个根本性风险，即安全、武器和成本。这些风险始终困扰着此前对乏燃料的回收使用。当这些国家在追求可替换技术时，应该考察钚铀混合氧化物的国际经验，由此了解这一做法为何失败。只有这么做，这些国家才能意识到，除了面对将快反应堆进行商业化的障碍之外，他们计划的、通过回收钚使用以获取能源的方法可能面临相似的挑战。几乎每一个尝试将快反应堆商业化的国家都在技术和经济上失败了。³³

对乏核燃料进行后处理来提取钚是一种生产核武器的极好办法。不过，这本书对历史的详细分析表明，那是一种低效、

危险、和不必要的生产电力的方法。除非（或者说直到）乏燃料的回收使用在安全、保卫和经济上有重大的改进，对本书提出的问题——“钚能提供能源吗？”——的回答将始终是一个洪亮的“不”。

尾注：

¹富含信息、关注个别国家的项目的文章和论文的确存在，这本书中讨论个案的章节对它们均有引用。目前为止至少有两份简要的、国家间的比较分析研究，分别是：Per Högselius, “Spent nuclear fuel policies in historical perspective: An international comparison,” *Energy Policy* 37, 1 (2009): 254-263, and D. Haas and D. J. Hamilton, “Fuel cycle strategies and plutonium management in Europe,” *Progress in Nuclear Energy* 49, 8 (2007): 574-582. 一个日本的非政府组织在上世纪九十年代评估了混合物氧化燃料的安全、防护和经济，但这个评估并不是在一个比较性的国家框架内展开：Jinzaburo Takagi, et al., *Comprehensive social impact assessment of MOX use in light water reactors* (Tokyo: Citizens’ Nuclear Information Center, 1997), http://www.cnrc.jp/english/publications/pdf/ima_fin_e.pdf.

Frank Barnaby 也写过一篇对那个时代的简短批评：Frank Barnaby, “How Not to Reduce Plutonium Stocks: The Danger of MOX-fuelled Nuclear Reactors,” Corner House Briefing 17, December 30, 1999, <http://www.thecornerhouse.org.uk/resource/how-not-reduce-plutonium-stocks>.

² Thomas B. Cochran, et al., *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status* (International Panel on Fissile Materials, 2010).

³ J. Samuel Walker, “Nuclear Power and Nonproliferation: The Controversy over Nuclear Exports, 1974–1980,” *Diplomatic History* 25, 2 (2001): 215-249. 美国的这项政策是针对印度在

1974年提出的“和平核爆炸”的回应。“和平核爆炸”实验显示，从看似和平的乏燃料中分离出的钚可以被用于制造核武器。美国的这项政策采用强制性的手段，比如对于那些源自美国本土或是在以美国技术为基础的反应堆中接受辐照的乏燃料，因为美国持有的同意权，美国可以威胁不发给后处理乏燃料的许可证。

⁴ A. Vielvoye and H. Bairiot, “Economic optimization of MOX fuel,” *Nuclear Europe Worldscan*, 11, 1/2 (1991): 13. 对混合氧化物燃料而言，这些活动招致了制造成本中的绝大部分。与此相反的是，就低浓铀燃料而言，这类活动只招致大约20%的制造成本，并且这个比例中已经包括了用于燃烧棒和组件的硬件，将六氟化铀（UF₆）转化为硝酸双氧铀（UO₂），工程和经济上的供给，和核电厂间往返的交通费用。制造成本没有包含重金属的投入。

⁵ *Plutonium Separation in Nuclear Power Programs: Status, Problems, and Prospects of Civilian Reprocessing Around the World* (International Panel on Fissile Materials, 2015).

⁶ 2018年美国提议的“稀释和处置”的计划中估算，每公斤的钚需要耗费50万美元。虽然这个费用昂贵，但比起用混合氧化物燃料来处理所需的费用，它比后者的三分之一还少，后者的费用是每公斤钚约耗费160万美金。U.S. Department of Energy, “Surplus Plutonium Disposition Dilute and Dispose Option Independent Cost Estimate (ICE) Report,” April 2018, <https://s3.amazonaws.com/ucs-documents/global-security/dilute-and-dispose-independent-cost-estimate-4-18.pdf>. 在欧洲，钚在市场上的负价格是每公斤成千上万美元（见第八章）。

⁷ 见第五章。“MOX imports have cost at least ¥99.4 billion, much higher than uranium fuel,” *Energy Monitor Worldwide*, February 23, 2015.

⁸ Atomic Energy Commission Bureau, “Estimation of Nuclear Fuel Cycle Cost,” November 10, 2011, http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1_e.pdf.

⁹ 见第二章。Belgonucléaire, “Comparison of MOX & U Fuel Assembly Costs,” 1998, 3.

¹⁰ 见第六章。Jurgen Krellmann, interview with Kelli Kennedy, Marseilles, France, January 4, 2018. Dr. Christoph Pistner, interview with Kelli Kennedy, Darmstadt, Germany, January 10, 2018. Dr. Klaus Janberg, interview with Kelli Kennedy, Dusseldorf, Germany, January 6, 2018. Wolfgang Heni, Interview with Kelli Kennedy, Darmstadt, Germany, January 12, 2018. Wolfgang Heni, “Physical, Technological, Ecological, and Economic Aspects for The Optimization of the Nuclear Fuel Cycle,” Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 1994.

¹¹ 见第八章。EPZ, “Milieueffectrapportage Brandstofdiversificatie,” July 2010, Figure 2.9.1.

¹² Peter Jones, *The Economics of Nuclear Power Programs in the United Kingdom* (New York: St. Martin's Press, 1984): 55.

¹³ 见第七章。一位要求匿名的前核运营商的雇员在2018年1月10日接受了Harry Kim的采访。我们因此得知，瑞士的核设施签署合同，将他们的钚和贫化铀混合，而不是和天然铀混合，由此将他们需要购买的混合氧化物燃料的数量最小化。H. Bay and R. Stratton, “Use of Mixed Oxide Fuel in a Pressurized

Water Reactor Experience of NOK, Switzerland,” International Topical Meeting on Safety of Operating Reactors, American Nuclear Society, San Francisco, CA, 1998, 293.

¹⁴ 见第三章。

¹⁵ Vielvoye and Bairiot, “Economic optimization of MOX fuel,” 15, 观察到“为维持合理的生产费用，制造混合氧化物燃料的核电站必须在正常产能或是接近其正常产能的水平运营。”

¹⁶ *Plutonium Separation in Nuclear Power Programs*, 138 (footnote 16), www.fissilematerials.org/library/cha00.pdf, which analyzes Jean-Michel Charpin, Benjamin Dessus, and René Pellat, “Economic forecast study of the nuclear power option,” Report to the Prime Minister, July 2000, Appendix 1.

¹⁷ 估算的约是总成本的四分之三。见“The Future of the Nuclear Fuel Cycle,” MIT, April 2011, 21.

¹⁸ Yukio Tajima, “Japan's 'plutonium exception' under fire as nuclear pact extended; Beijing and Seoul question why US allows only Tokyo to reprocess,” *NIKKEI Asian Review*, July 14, 2018, <https://asia.nikkei.com/Politics/International-Relations/Japan-s-plutonium-exception-under-fire-as-nuclear-pact-extended>. Lee Min-hyung, “NK slams Japan's plutonium stockpiling,” *The Korea Times*, August 5, 2018, https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2018/08/356_253381.html.

¹⁹ WISE-Paris, “Belgium: Scheduled End to Reprocessing and to MOX Use,” January 21, 1999, http://www.wise-paris.org/index.html?/english/ournews/year_1999/ournews000099

0121.html. Jan Vande Putte 在 2018 年 1 月 12 日接受了 Valentina Bonello 的采访。根据 Jan Vande Putte 的说法，他也将对核扩散的顾虑列为一个根本原因。

²⁰ *Sécurité nucléaire: le grand mensonge*, film documentary, directed by Éric Guéret, ARTE, 2017.

²¹ *Sécurité nucléaire: le grand mensonge*.

²² 每个集装箱含有最多 280 公斤的铀氧化物（见第三章）。

²³ “Audition de M. Philippe Knoche, directeur général d’Orano (ex-Areva),” Commission d’enquête sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, March 8, 2018.

²⁴ Nuclear Control Institute, “The Plutonium Threat,” <http://www.nci.org/new/nci-plu.htm>.

²⁵ Republic of France, “Sixième rapport national sur la mise en œuvre des obligations de la Convention commune,” October 2017, 36, which states, “l’utilisation du plutonium dans les combustibles MOX permettant de consommer environ un tiers du plutonium, tout en dégradant significativement la composition isotopique du plutonium restant, fait que cette technologie n’est pas proliférante.”

²⁶ Gregory S. Jones, *Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons* (Arlington, VA: Nonproliferation Policy Education Center, 2018). Bruce T. Goodwin, “Reactor Plutonium Utility in Nuclear Explosives,” Lawrence Livermore National Laboratory, November 6, 2015. 过去的怀疑论者已经强调，使用从乏混合氧化物燃料中分离出的铀来制造一个可靠的核武器将遭遇各种潜在的困难。见 Bruno Pellaud, “Proliferation aspects of plutonium

recycling,” *C. R. Physique* 3 (2002): 1067–1079. 全世界大约只有1%的民用钚是从乏混合氧化物燃料中分离出来的。

²⁷ National Research Council, *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation* (National Academy Press, 1996): 3. Lindsay Krall and Allison Macfarlane, “Burning waste or playing with fire? Waste management considerations for non-traditional reactors,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 74, 5 (2018): 326-334.

²⁸ Frank von Hippel and Gordon MacKerron, *Alternatives to MOX: Direct-disposal options for stockpiles of separated plutonium* (International Panel on Fissile Materials, 2015). 这两个国家已经有一个双边机制可以促进类似的技术合作，即“美-日钚管理专家组”。见 U.S. National Nuclear Security Administration, “Prevent, Counter, and Respond – A Strategic Plan to Reduce Global Nuclear Threats, FY 2017 – FY 2021,” Report to Congress, March 2016, 2-4.

²⁹ Alan J. Kuperman and Hina Acharya, “Japan’s Misguided Plutonium Policy,” *Arms Control Today* (October 2018): 16-22, <https://www.armscontrol.org/act/2018-10/features/japan's-misguided-plutonium-policy>. Alan J. Kuperman, “How not to reduce Japan's plutonium stockpile,” *Kyodo News*, op-ed, July 13, 2018, <https://english.kyodonews.net/news/2018/07/f91d38319475-refiling-opinion-how-not-to-reduce-japans-plutonium-stockpile.html>.

³⁰ Timothy Gardner, “Trump administration axes project to generate power from plutonium,” *Reuters*, May 13, 2018.

³¹ von Hippel and MacKerron, *Alternatives to MOX*. 在现有的多边协议下的国际技术合作可以促进这类处置，比如“国际钚管理圆桌会议”，包括英国、法国、日本和美国。见 U.S. Department of Energy, “Departmental Response: Assessment of the Report of the SEAB Task Force on Nuclear Nonproliferation,” October 2015, 12-13.

³² National Research Council, *Nuclear Wastes*. Krall and Macfarlane, “Burning waste or playing with fire?” James M. Acton, “The myth of proliferation-resistant technology,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 65, 6 (November/December 2009): 49-59. Edwin S. Lyman, “The Limits of Technical Fixes,” in *Nuclear Power & the Spread of Nuclear Weapons*, eds. Paul Leventhal, et al. (Dulles, VA: Brassey’s Inc., 2002): 167-184.

³³ 俄罗斯是例外，尽管从1980年到1997年它最成功的快反应堆 BN-600 在蒸汽发动机中仍旧有14种钠火。见 Thomas B. Cochran, et al., “It’s Time to Give Up on Breeder Reactors,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 66, 3 (2010): 50-56.