

E#5 #3

能 源 与 安 全

能源与环境研究所出版·美国华盛顿·一九九七年总第三期

武器级钚用作反应堆燃料

阿琼·麦卡贾尼

阿妮塔·塞斯

冷战结束后，美国和俄罗斯面临一个前所未有的、未曾预想到的问题，制造核武器的两种关键材料——钚和高浓铀——出现过剩。

原则上，在这两者中铀引起的问题少些，因为它可以被混合成广泛用于反应堆的低浓铀。

1993年，美国和俄罗斯签署一项协议。根据该协议，美国将在20年内向俄罗斯购买500公吨正在俄罗斯被混合成反应堆燃料的高浓铀。尽管这一协议起步时实施缓慢，但现已进展到条约规定的进度。

更困难的是把过剩的钚变成不能用于制造核武器的形式。

美国已宣布(在总共约100公吨储存的钚中)约有50公吨的钚剩余¹，而俄罗斯尚未正式宣布其钚剩余量。据估计，俄罗斯的军用钚总量约有

130公吨，也许更多。

美国和俄罗斯对何种办法处置剩余武器级钚最好，意见不一。俄罗斯原子能部把钚视为有价值的能源，但美国的主流观点(尽管仍有些不同意见)认为，钚是安全和经济负担。尽管观念上有差异，自1994年以来，美、俄已就如何处置剩余武器用钚进行了合作。由两国科学家和官员组成的研究小组编写，并在1996年9月出版的《美—俄钚处置联合研究》，就是这一合作的成果。

这一联合研究列出处理剩余武器用钚的许多选择方案，并反映出两国政府在该问

在本期内

武器级钚用作反应堆燃料	1
处置会成为钚的复兴之路吗?	10
钚对健康的影响	12
混合氧化物在法国和比利时的使用	15
俄罗斯的混合氧化物燃料生产——状况与前景	17
钚怎样随时间而变化	19

▲用手套盒来处理钚，因为即便是微量吸入钚，也会带来严重的危险。

题上的一致与分歧。两国政府一致认为，及时把剩余军用钚转化为非武器用钚很重要。在这报告中，美、俄共同提出了四种方案。此外，俄罗斯还单独提出了两种方案。美、俄共同提出的四种(处理剩余武器用钚的)方案是：

- 1) 用作轻水或重水堆中的混合氧化物燃料(MOX)；
- 2) 用作快堆中的混合氧化物燃料；
- 3) 固定于玻璃或陶瓷中；
- 4) 直接储存于地下。

俄方单独提出的两种方案是：

- 1) 将剩余钚用于高温气体反应堆；2) 用于基以加速器的系统中。

共同方案中的第一、二种都要求把钚用作反应堆燃料。钚将被转化为氧化物的化学形式，与氧化铀混合，并装入陶瓷燃料球(简称混合氧化物燃料)。混合氧化物燃料中的铀同位素是非裂变的铀-238。将混合氧化物燃料填入燃料棒，装入反应堆，完全或部分取代目前使用的由浓缩裂变同位素铀-235而成的铀燃料。在这些方案中，(在轻水堆和快堆中使用)混合氧化物燃料和(把钚与玻璃或陶瓷混合)进行固定是两种受到认真研究以便在近期内实施的技术。

美俄联合研究的结论是，受到考虑的技术中，最成熟的是那些使用已知的和已经示范的反应堆的方案以及使用混合氧化物制造技术。就技术成熟性而言，固定化技术要欠成熟一些。这些判断主要基于欧洲在轻水堆中使用混合氧化物燃料的经验，以及俄罗斯研制快堆用混合氧化物燃料的经验。然而，民用钚(在欧洲使用)和军用钚之间的许多区别降低了这一判断的确定性。进一步来说，在综合判

断技术相对成熟性的过程中，欧洲在高放射性废物玻璃化(最成熟的固定方法)方面几十年的经验看上去并没有被考虑在内。

认识到美、俄政府意见有差别，这一报告称，“美国和俄罗斯不必采用相同的钚处置技术。事实上，鉴于两国经济形势、核基础设施以及燃料循环政策的不同，两国处置剩余钚的最佳方案不同是可能的”²。而且，任何一方使用的方案也可能不止一种。

混合氧化物燃料的制造³

在工业生产层次上，武器级钚尚未被用来制造混合氧化物燃料。目前，工业上的混合氧化物设施使用二氧化钚。这些二氧化钚产自再处理动力堆乏燃料的设施中(称为反应堆级钚)。它与使用军用钚有一些重要的区别(见第19页)。商业再处理厂目前采用水成技术(就是用酸和其它液体溶剂)把乏燃料中的钚和铀从裂变物质中分离出来，并使它们彼此分离。其最终产品是二氧化钚粉末，它能直接用于混合氧化物燃料的生产。相反，大多数军用钚以“芯”形态存在，它们由钚金属和少部分的其它材料构成。而且，在美国和俄罗斯(也许在其它核武器国家也如此)，武器用钚中含有1%的镓。镓使混合氧化物燃料的制造过程复杂化，因此，在制造燃料前必须将镓从武器级钚中几乎去除干净。所以，武器用钚金属在使用前必须既要提纯，又要转化为氧化物形式(不一定要按此顺序)。这样，用武器级钚制成混合氧化物燃料包含了再处理来自动力堆燃料中的钚所不需要的步骤和程序。⁴

目前，把武器级钚变为适于混合氧化物燃料制造厂使用的进料所采用的水成技术与再处理相似，这一过程排放出大量液体废料（有关再处理的更多信息，请参阅《能源与安全》总第二期）。以干式法制造氧化钚并去除镓，尚处实验室阶段。将混合氧化物处置钚达到工业化阶段还需4—5年时间。美国已经宣布，它希望使用干式ARIES过程以从钚芯中清除镓，而俄罗斯主要考虑水成和熔化盐技术（它正和法国开展这方面的合作）。

在美国，混合氧化物燃料于六、七十年代就被用于轻水堆的实验中。美国只在小型手套盒(glove-box)设施中制造混合氧化物燃料。如果美国决定采纳混合氧化物方案，它就非得建造一座新的燃料制造厂或完成华盛顿州汉福德地区的燃料材料实验设施。这一实验设施建于70年代，其目的是生产快增殖堆燃料，现在仅完成了一部分。

俄罗斯为增殖堆研制混合氧化物燃料有很长的历史，但是在美国钚处置项目找到更多理由来考虑这一方案之前，俄罗斯能源部很明显地没有考虑在轻水堆里使用混合氧化物燃料。如果采纳快堆方案，混合氧化物燃料的制造将在马亚克（车里亚宾斯克附近）进行，那里有部分造好的Complex-300设施。如果采用水堆方案，钚转化和混合氧化物燃料制造设施将被建于热烈兹诺戈尔斯克（克拉斯诺亚尔斯克-26）

所有反应堆方案与一些玻璃化方案相比，都需要更长的时间以达到把剩余钚转化为不再可用于武器的形式。

的RT-2厂。（有关俄罗斯混合氧化物燃料调制的更多信息，参见第17页）。

相对于制造铀燃料而言，这份联合研究报告提出了对于制造混合氧化物燃料所必需的许多安全预防措施。混合氧化物燃料释放出比铀燃料更高的伽马辐射和高出很多的中子辐射。因此，也许需要分开的新燃料储存设施，它经设计将只存放混合氧化物燃料。也许还需要运输新燃料的设备。由于存在吸入钚的危险性，混合氧化物制造过程中产生的尘埃也是工人人身安全的一个顾虑。（参阅《钚对健康的影响》一文，第12页）。

考虑中的反应堆方案

在反应堆中通过辐照把钚转化成不能用于武器的燃料，所需的时间由许多因素决定：

- 所使用的反应堆的数量、大小和种类；
- 反应堆的平均输出功率；
- 混合氧化物燃料中钚的百分比；
- 反应堆核中混合氧化物燃料所占的百分比。

应该强调的是，人们普遍认为，所有反应堆方案与一些玻璃化方案相比，需要更长的时间以达到把剩余钚转化为不再能用于武器目的的形式。此外，最初可能低估了反应堆方案所需的时间。需要建造反应堆的方案所花的时间可能最长。

为了处置（剩余钚），俄罗斯正在考虑在快堆（也称作快增殖堆）和轻水堆中使用混合氧化物燃料（钚、铀氧化物的混合物）。而美国于1996年12月宣布，它将采用“双轨”战略，既研究在轻水堆中使用混合氧化物，又

研究根本不再把钚作为燃料使用的固定化方案⁵。尽管美国参加了联合报告中有关在快堆中使用混合氧化物部分的讨论，但它将不采用该种方案。以下部分将介绍使用轻水堆的主要方案，以及俄罗斯在快堆中使用混合氧化物的可能做法。

现有的热堆

美国许多运行中的反应堆具有填装混合氧化物燃料的潜力。美国能源部已先后接到18个动力部门的意向，表示愿意提供38个反应堆来以混合氧化物形式燃烧钚。目前不是所有方案都能引起兴趣，但情况在发生变化。这些部门提出方案以及核管制委员会发放使用混合氧化物的许可证（如果许可证申请被认为合适）的正式程序正在进行中。

俄罗斯利用现有热堆处置钚的选择比较有限。出于安全原因，以石墨为缓冲剂的RBMK反应堆和小型轻水堆VVER-400已被排除在考虑之外。只有较大的轻水堆设计（VVER-1000）才能填装混合氧化物燃料，而且混合氧化物只占堆芯的三分之一（换句话

说，反应堆燃料棒的三分之二是普通的铀燃料。剩下的三分之一才是混合氧化物）。然而美国国家科学院1995年的报告指出，即便是VVER-1000型反应堆“目前也未达到国际安全标准”⁶，因此在使用混合氧化物前必须加以改进。

另一个麻烦是，俄罗斯7座运行中的VVER-1000反应堆无法按照联合小组设定的时间在20-40年里消耗掉50公吨剩余钚。为了实行水堆方案，必须完成在加里宁和罗斯托夫已部分造好的3座VVER-1000反应堆。另一个方案是，除俄罗斯的反应堆外，在乌克兰的11座VVER-1000反应堆中使用混合氧化物燃料。其它可用来缩短处置剩余钚所需时间的措施有：在目前预期的30年外，延长反应堆的工作寿命；使填装在反应堆芯的混合氧化物超过三分之一；提高混合氧化物中钚的含量（超过目前预期的3.9%）。这些做法会带来尚未充分认识的安全风险。

即使只在反应堆核的三分之一空间填装混合氧化物，VVER-1000反应堆在可以填充钚燃料之前可能仍需进行改进。联合报告提到了几种可能的措施，其中大部分与保持反应堆控制有关（请参阅下文关于安全问题的进一步讨论）。联合报告中给出的时限，设想于2001年在第一座VVER-1000反应堆中填充混合氧化物，于2028年完成处置（使用10座堆芯的三分之一为混合氧化物的反应堆，混合氧化物中钚的含量为3.9%）。

“演进中的反应堆”

由于已进行适当修改来增加（对反应堆的）控制，美国和俄罗斯都在考虑使用堆芯能百分之百采用混合氧

能源与环境研究所出版物

玻璃中的裂变材料

阿琼·麦卡费尼、安妮·麦卡费尼著
能源与环境研究所出版社，1995年

提供英、俄两种版本，平装，126页。

能源与环境研究所的报告分析了处置钚和高浓铀的方案，其推荐的政策是尽快将这些材料变为不再能用于武器的形式。

这一报告的各个部分——以及能源与环境研究所的介绍、技术报告、和其它出版物的精选——均刊于本研究所在万维网上的主页：<http://www.ieer.org>。

化物的新型反应堆设计。美国可能使用亚利桑那公共服务公司现有的3座在帕洛弗迪的System-80反应堆。俄罗斯也正在考虑建造至多达5座VVER-640(NP-500)反应堆(由西门子公司提供设备和控制系统)。然而，即便这些反应堆的核心可以百分之百地使用混合氧化物，混合氧化物中所含钚的百分比可能相对较低，以致于需要制造大量的混合氧化物燃料。因此，从这种方法处置钚的速度来看，收益相对较小。联合报告声称，据信，VVER-640反应堆可以采用百分之百为混合氧化物的核心，其中钚含量为3.7%⁷。

“坎杜”反应堆

美国和俄罗斯考虑中的第三种方案是加拿大的重水堆(称为“坎杜”反应堆，它们以天然铀为燃料，以重水为减速剂和冷却剂)。与需要阶段性停工换料的轻水堆不同，这种反应堆不间断地进行加料。

“坎杜”反应堆或许可以百分之百地使用混合氧化物为核心。根据加拿大原子能有限公司的说法，“坎杜”反应堆可以在不改进构造的情况下，使用百分之百的混合氧化物为堆芯，钚含量可达0.5%至3%⁸。但是，它仍需获得新的许可证，因为目前尚无“坎杜”反应堆获得使用混合氧化物燃料的许可证。“坎杜”反应堆可以使用百分之百为混合氧化物的核心，是因为它有足够的空间以附加可能用得着的控制片(与控制棒类似)。

从可控性来看，“坎杜”反应堆在使用混合氧化物燃料方面看上去有许多重要的优势。每单位混合氧化物产生的动力高于每单位天然铀燃料产出的动力。随着产出较高的动力，这

些反应堆生成高放射性废物的数量就比目前“坎杜”反应堆生成的要少。

然而，“坎杜”反应堆也有许多不利的方面。诸如，需要国际运输混合氧化物燃料，而这些燃料可以用相对直接的方式通过化学反应分离出铀和武器用钚。由于“坎杜”反应堆使用小型的燃料束，且燃料束有被实时转移的可能(因为加料在不断进行)，就需要更多的防卫措施以对付钚盗窃和移用。使用“坎杜”反应堆也可能要求生产比使用轻水堆更多的混合氧化物燃料。因为“坎杜”堆中混合氧化物燃料的含钚量为1.5%-2.7%，而轻水堆中混合氧化物燃料的钚含量可达2.5%-6.8%(具体百分比依特定的反应堆而定)¹⁰。

快中子反应堆

出于高成本和对扩散的忧虑，美国中止了其快堆计划(也称为“增殖”堆)。然而，俄罗斯能源部继续广泛开展对增殖堆的研究，因为它把钚看作一种能源财富。目前，俄罗斯能源部在别洛雅斯克运行着一座快中子堆BN-600，它的燃料是高浓铀。俄罗斯已计划另造4座快中子堆，其中3座在马亚克，1座在别洛雅斯克。其中2座快中子堆(各地一座)于80年代开始建设，但是在90年代初由于资金缺乏和地方因环境问题的反对而停工了。俄罗斯能源部最近宣布它有意恢复以上项目的建设，目前正在审议这些项目的许可证，但经费着落仍很不确定。

通过沿反应堆芯径向移走增殖物，快中子堆能够完成钚处置。这样，这种反应堆就由钚生产者变为钚的净燃烧者(注意，这并不意味着所有的钚都被消耗了，只表明乏燃料中

的钚含量将少于新鲜燃料中的钚含量)。当然,从扩散的角度看,增殖堆的一个问题是,这种反应堆可以插入铀覆盖物,并用之产生更多的钚,包括武器级和超级钚。

俄罗斯能源部建议在马亚克建造一座BN-800反应堆以处置钚。根据设计, BN-800反应堆将使用百分之百为混合氧化物的堆芯。联合报告称, BN-800反应堆每年可以使用1.6公吨钚,这样可在30年内完成50公吨钚的处置。设计中的BN-800反应堆的混合氧化物堆芯将由反应堆级钚构成,但是基于20年前的计算,联合报告称,使用武器级钚不会严重改变反应堆的运行情况。鉴于此问题关系重大,看上去需要进行更新、更独立的评估。

俄罗斯能源部还计划在别洛雅斯克完成第二座BN-800反应堆的建设。这一反应堆可以填装马亚克RT-1厂分离出的约含有30公吨商业钚的混合氧化物燃料。这第二座反应堆也可作为处置钚的备用设施。在建设资金尚未安排、但会经费足够的情况下,联合报告预期第一座BN-800反应堆的建设将于2005年完成。

联合报告宣称,如果转化和燃料制造设施早日获得资助,现有的BN-600反应堆可早至2000年时就用作使用混合氧化物燃料的示范堆。然而, BN-600反应堆只能处理部分为混合氧化物的堆芯,而且该报告指出,在这种没有径向增殖覆盖物的反应堆中使用混合氧化物燃料,需要增加对其安全性的研究。这种反应堆每年能消耗约0.5公吨钚,或者说,在2010年其工作寿命结束之前,它可消耗约5公吨钚。

在增殖堆中处置钚带来许多附加的安全和扩散风险。快堆中使用的混合氧化物燃料比轻水堆燃料含有更多

的钚。由于这种燃料中的钚含量较高,乏燃料中的钚就会增加:根据联合报告,大约为20%。尽管俄罗斯原子能部宣称, BN-600反应堆有“极好”的安全和环保记录,该报告同时指出,这种反应堆运行的头14年中发生了约30次钠泄漏。此外,国际上使用快增殖堆的经历也并不十分令人满意。安全和技术操作问题或者说事故已导致美国、日本和法国的该型反应堆临时或永久性地关闭。

轻水堆有关混合氧化物的安全和许可证问题

绝大多数轻水堆的设计并非以钚为燃料。尽管钚-239和铀-235都是裂变材料,它们每单位重量可产生的能源量相近,但作为影响反应堆安全性的反应堆燃料,它们有许多不同。基本的考虑与反应堆的控制有关。反应堆的链式反应必须极其精确地加以维持。这种控制通过使用通常由硼制成的控制棒和(在压水堆中)把硼溶入水中来完成。控制棒作用在于提高或降低反应堆的动力以及有序地关闭反应堆。它们防止核反应失去控制,那可能导致灾难性事故。

应该指出的是,尽管所有商业轻水堆中都有一定数量,在反应堆运行中由燃料中的铀-238所产生的钚,但当反应堆使用低浓铀时,钚总量只有约1%或更少。如果使用的是混合氧化物燃料,钚总量总会相当高。正是这一区别引起了许多反应堆控制问题¹¹。

改变燃料会影响燃料棒的性能,从而提供所需的反应堆控制。在新燃料使用之前,也需要对反应堆进行改动。因此,对燃料作出重大改变也就要求反应堆重新获得许可证。

混合氧化物燃料和铀燃料使用中的一些区别影响(反应堆)的安全:

- 钚裂变率随温度的升高趋向于提高。这可能对反应堆的控制产生不利影响,而要求有补救措施。与用反应堆级钚制成的混合氧化物相比,这一问题在使用武器级钚制成的混合氧化物燃料时更为严重。
- 反应堆控制取决于铀或钚裂变后几秒至几分钟内释放的少量中子(称为延期中子)。铀-235裂变产生约0.65%的延期中子,而钚只产生0.2%的延期中子。这意味着,如果使用钚燃料而目前的控制水平和速度又不充分的话,必须采取防备措施以提高控制能力。
- 使用钚燃料的反应堆产生的中子比使用铀燃料的反应堆产生的中子具有更高的平均能量。这提高了对反应堆部件的辐射损伤。
- 钚捕获中子的几率大于铀。结果,为控制反应堆,需要更多的中子吸收剂。
- 燃料中钚含量较高,在严重事故中就会向环境中释放出更多的钚和其它超铀元素。
- 经辐照的混合氧化物燃料热量比铀燃料高,因为使用混合氧化物燃料时,反应堆运行时会产生更多超铀元素。

总的来说,与反应堆控制有关的问题无论在正常操作还是在危急时刻,都是最关键的。大多数独立的机构已经指出,如果反应堆不是特别设计来使用混合氧化物燃料的,轻水堆燃料中只有约1/3可以使用混合氧化物。然而,既然混合氧化物燃料与铀燃料混合在一起,堆芯部分使用混合氧化物燃料就会产生一些操作问题。

它们在控制、放射性和热能方面的不同特征意味着反应堆中的环境不一致,这使操作和控制更复杂。一些反应堆操作者声称,他们在不需要对反应堆或控制棒进行改进的情况下就可使反应堆芯百分之百为混合氧化物。这种说法对安全的影响需要独立研究加以核实。

美国发放许可证程序的细节已众所周知。正如联合报告认识到的,这一过程包括各种细节、公开而且费用昂贵,几乎肯定会引起争论。然而,俄罗斯核管制机构的作用尚不清楚,也不知道它是否具有足够的资源来确保一个完整的许可证(发放)程序。联合报告承认,俄罗斯核管制机构尚未开始考虑混合氧化物的许可证问题,而且公众参与许可证发放程序也是个问题。联合报告没有详细说明俄罗斯的许可证发放程序,只是说“假定所有设施从适当的国家权威机关获得许可证。”

混合氧化物乏燃料

反应堆中使用混合氧化物燃料时,钚同时在消耗和产生。混合氧化物乏燃料比普通乏燃料(指从低浓铀为燃料的轻水堆中产生的乏燃料)含有更多的钚。轻水堆中产生的普通乏燃料从反应堆中卸下来时,通常包含1%钚。混合氧化物乏燃料中残余钚的数量取决于钚的初试填装量(燃料中钚的百分比)、燃料的燃耗以及所用燃料的构形。

至于使用混合氧化物燃料的轻水堆,美国国家科学院的计算表明,乏燃料中残余钚的比例在1.6%(对钚含量为4%、33%采用混合氧化物的堆芯而言)至4.9%(对钚含量为6.8%、百分之百采用混合氧化物为堆芯的反

应堆而言)之间。他们已建议,填充燃料中钚的含量应在2.5%至6.8%之间。对堆芯百分之百使用混合氧化物的“坎杜”反应堆来说,钚含量为1.2%和2.1%的混合氧化物,其乏燃料中的钚含量在0.8%和1.4%之间。¹²

混合氧化物乏燃料的贮藏处置很复杂,这不仅因为混合氧化物中的钚含量较高,而且因为乏燃料中有更多的超铀元素。这导致混合氧化物乏燃料比普通乏燃料要热。出现更多数量镅-241之类的超铀放射性核素,也引起乏燃料温度的持续较高,并使热能衰退较慢。因此,使用混合氧化物乏燃料可能要求重新审议许多问题,如运输和置放容器的设计,和乏燃料现场储存桶的设计。例如,较高的温度可能给乏燃料池储存空间有限的反应堆带来储存问题。如果储存处的原设计未考虑到接收较高温度的燃料并能耐较高温度,这种较高的温度还将导致需要更多的贮存空间。较大的贮存空间相应地带来较高的置放成本。另外,如果混合氧化物乏燃料中残余镓的数量太高,将导致乏燃料外包层的恶化,在评估贮藏地是否适当时造成新问题,并带来地面水污染的更大风险。至于可能对乏燃料完整性产生不利影响的镓聚集,也有不确定性。

混合氧化物乏燃料和铀乏燃料之间的区别也会使再处理更为复杂。

对不扩散的顾虑

在许多关于混合氧化物的官方讨论认为混合氧化物会“燃烧掉”钚的同时,正如上面所指出的,现实中钚在核反应堆里既被消耗(“燃烧”),又有产生¹³。钚处置方案的主要功能不是消除所有的钚,而是:

- 把钚与其它材料——通常是强放射性的裂变物质——混合,以致于很难将其重新提取出来在武器中使用;
- 以及通过把钚置于高放射性储存形式中来防止钚被转移,因为那种储存形式对任何企图盗窃钚的人来说都是致命的。

按照及时性、防盗窃和防转移的程度以及防回收、防提取或防重新使用的程度,联合报告对每种钚处置方案以不扩散标准进行评估。它同意这种看法,为了达到及时性目标,各种方案应在20-40年间处置50公吨钚。衡量处置后钚的最终形式防盗窃和防转移能力的通用尺度是所谓的“乏燃料标准”。这一标准在1994年美国国家科学院的报告中得以明确,这意味着钚应该象储存中的商用低浓铀燃料中的钚一样不易被盗窃、转移和重新提取。

然而,在评判钚的长期安全性时,这一标准有一重大缺陷。“乏燃料标准”内含的假设是钚将剩留在乏燃料(或者任何它已被置于形式)中——这是说,它被封盖起来作地理处置。然而,联合报告声称,俄罗斯的政策不考虑对含钚材料(包括乏燃料)作最终掩埋,而要通过再处理重新提取钚。俄罗斯原子能部在许多场合已清楚地表明,它有意再处理混合氧化物乏燃料,其结果使“乏燃料标准”从长远来看变得毫无意义。从钚处置计划来看,美国看上去准备同意俄罗斯原子能部再处理混合氧化物乏燃料。联合报告强调,“俄罗斯最终将再循环任何剩余在[混合氧化物]燃料中的钚。当武器级钚的同位素由辐照所改变、燃料具有了显著的放射性屏障、燃料在再处理前储存了几十年之后,美国处置钚的目标就达到了。”

费用问题

尽管钚可被用来在核反应堆中产生电力，但是，使用混合氧化物燃料将得不偿失。这是因为即使是无偿获得钚，但在把包括原材料成本在内所有费用计算进去后(进一步费用讨论，参见《能源与安全》第一期)，制造混合氧化物燃料也要比购买低浓铀燃料更昂贵。根据美国国家科学院的估计，用50公吨钚制造混合氧化物燃料，其费用约20亿美元。如果混合氧化物中钚含量为5%，与铀燃料成本相比，仅制造混合氧化物燃料以处置50公吨的额外费用就达5亿美元。事实上，美国的成本可能还要高出许多，因为各动力公司希望获得补贴以实施处置任务，也因为许多其它的不确定因素和耽搁会使成本提高。

美国和俄罗斯对总成本的估算不同，这是因为反应堆所有权和运行方式不同，也因为两国乏燃料政策有不同。在燃料本身成本之外，还有获取反应堆许可证的费用，运输和安全保障的费用，反应堆建设和改造的费用(如果有此要求的话)。一般来说，俄罗斯的成本估算由于其迅速变化的经济形式而较为不确定。由于再处理乏燃料的政策，俄罗斯的成本估算只包括50年的储存费用而不是最终处置的费用。

¹ 其中大约12公吨是军用厂生产出来的非武器级钚。

² 《美-俄钚处置联合研究》，1996年9月，ExSum部分，第2页。

³ 除非另外注明，有关在反应堆中使用混合氧化物燃料的技术方面资料取自：国际安全和军备控制委员会属下通过以与反应堆有关的方案处置多余武器用钚专家小组：《管理和处置额外武器用钚：与反应堆有关的方案》，美国国家科学院出版社，华盛顿特区，1995年。

⁴ 为了使混合氧化物得以在新的制造设施建成前在反应堆中进行试验，在欧洲已考虑制造铅试验装置，但这看来越来越不可能。

⁵ 除非另外注明，有关美国能源部选择方案的事实来自：《储存和处置可用于武器的裂变材料的最终项目性环境影响声明：概要》，美国能源部裂变材料处置办公室，1996年12月。有关俄罗斯方案的信息来自：《美-俄联合钚处置研究》，1996年9月。不幸的是，该报告只有英文版，其概要于1997年年中以俄文出版。

⁶ 美国国家科学院，1995年，第137页。

⁷ 联合报告，WR部分，第27-29页。

⁸ 通过比较，轻水反应堆堆芯所含的混合氧化物燃料，其范围占堆芯的1/3~100%，其中钚含量为2.5%~6.8%不等。

⁹ 有关“坎杜”反应堆相对于美国轻水堆的优劣，见美国国家科学院，1995年，第146-151页。反应堆生产者建议混合氧化物燃料占1.5-2.7%。

¹⁰ 美国国家科学院，1995年，第121-122页。

¹¹ 有关反应堆控制的更多信息，见《科学为民主行动》，第5卷，第4期，1997年2月。

¹² 美国国家科学院，1995年，第252页，图表6-1。

¹³ 在商业堆中，由中子轰击铀-238嬗变而形成钚。

处置会成为钚的再兴之路吗？

阿琼·麦卡贾尼

在美国和俄罗斯，处置剩余的军用钚都是一个紧迫的不扩散目标。然而，目前对把剩余钚转化为混合氧化物燃料表示赞同的进程引起对扩散和安全问题的严重关注。为处置钚而使用混合氧化物燃料将兴建各种设施的基础建设，为发展长期的钚经济奠定经济利益，并由此增加扩散的危险。

有人希望，如果美国同意使用混合氧化物，俄罗斯会同意不对混合氧化物乏燃料进行再处理，或不把建造来处置剩余武器用钚的设施用于商业目的。这些希望尚未实现。相反，在处置钚的名义下，美国看上去不仅要放弃它坚持了几十年的不在商业堆中使用钚的政策，而且在帮助和支持俄罗斯建立钚经济的计划。

由克林顿和叶利钦总统的科学顾问签署的《美—俄钚处置联合研究》（见前文）表明，美国默认：“为了促使钚处置的目标尽快可行，如果选择反应堆方案，至少在目前分离钚过剩储存未被消除以前，由此产生的物质不应该进行再处理和再循环。一旦做到这一点，就可最终决定，对反应堆方案产生的高放射性含钚物质，应如美国所愿进行直接地理贮存，还是应象俄罗斯目前乐意的那样，即最

终进行再处理来复原分离出的钚”¹。稍后，联合报告说得更为明白：“……俄罗斯将最终再循环剩余在[混合氧化物]乏燃料中的所有钚。”而且，如果混合氧化物乏燃料“在再循环前储存上几十年”²，看上去就满足了美国的钚处置目标。

混合氧化物乏燃料的再处理是在现在进行还是在几十年后进行并不是问题的要害。只要建造和维持了混合氧化物燃料生产和再处理的基础设施，就会有足够的其它乏燃料要进行再处理，同时也会有足够的剩余钚提供给混合氧化物燃料的制造工厂。而且，如果俄罗斯再处理混合氧化物乏燃料，那就会使这种观念，即混合氧化物燃料的使用将把钚锁在高放射性基质中使之不能再用于武器，归于失败。尽管俄罗斯政府也许不想把反应堆级钚用于武器，但一些非核国家或恐怖组织可能愿意为这种可用于武器的材料出高价。进一步来说，在快增殖堆中使用武器级钚也许并不能明显降低其同位素的成分。事实上，用铀覆盖物操作时，可用增殖堆将钚由反应堆级提高到武器级。主要的限制可能仍是用于反应堆和再处理厂的经费。

联合报告还强调，“钚处置活动一旦结束，这些设施就可能被用于民用钚计划。对于这些建造了主要用于[俄罗斯]电力生产的[混合氧化物]设施来说，其退役成本是否也应归于钚处置任务，还不确定”³。如果在完成了军用钚处置后被用于商业目的，混

合氧化物制造设施将为俄罗斯钚经济计划目前缺乏的部分提供关键的环节。

这样，对美国来说，钚处置计划的最终后果正好资助了它应反对的事情：俄罗斯建立起钚经济的基础。滑稽但也许不是事先预谋的是，既然美国也要建造混合氧化物厂，而且看上去它日益不愿关闭其在南卡罗兰纳州萨凡纳河厂址运行了几十年的军用再处理厂，那么相似的基础也会在美国建立。

作为回报，美国在俄罗斯再处理混合氧化物乏燃料前会赢得几十年的时间，而且有些人希望，俄罗斯会在材料衡算问题上全面合作。但是到目前为止，与美国不同，俄罗斯还没有宣布它剩余材料的数量，而更为重要的是，俄罗斯尚未宣布其军事和商业武器用材料生产的总量。

即便是美国当前混合氧化物处置计划中最保守的目标也不可能以适时的方式实现。用混合氧化物处置钚在俄罗斯至少要30年，在美国可能也要差不多的时间。同时，许多钚将以武器用形式储存。鉴于对建立钚经济具有潜在作用，美国和俄罗斯都有许多人反对使用混合氧化物燃料，因此，这种钚处置方案所花的时间就可能更长。由于美国在去年12月宣布它的处置计划中将包括混合氧化物方案，在(美国)媒体和基层已明显引起了激烈的争论。在俄罗斯，自1989年

以来，(核城市外的)公众一致反对建造钚处理设施。这一反对持续至今。由于地方反对和资金缺乏，BN-800快增殖堆和RT-2再处理厂的建造分别在80年代末和90年代初停止。

俄罗斯确实需要大量的经济援助来保证其武器用材料的安全和把剩余钚转化为非武器形式。其需要经济援助的数额远远大于美国目前所提供的。而且，美国坚持通过提供更多的经济援助来从俄罗斯的行动中获得巨大的安全利益。但是，与在美国应避免此种开销的理由相同，美国对俄罗斯建立钚(经济)基础的可能帮助会产生相反效果。

既然俄罗斯不想把含钚材料作为废物处置，美、俄政府现在应该决定玻璃化钚并储存由此产生的玻璃棒。至今为止的谈判结果之一是俄罗斯至少已同意考虑固定化选择。玻璃化并随之进行安全的储存是较为安全、迅速和经济的方法，它能达到把剩余钚转化为非武器用形式这一紧迫的近期目标，并为就长期的钚安全问题达成良好的协议赢得所需的时间。

¹ 《美-俄钚处置联合研究》，1996年9月，ExSum部分，第2页。

² 同上，WR部分，第35-37页。

³ 同上。

钚对健康的影响

阿琼·麦卡贾尼

钚-239是一种极其危险的致癌物质，它可用来制造核武器。各种性能的综合使其成为最危险的物质之一。钚-239在自然界中仅以痕量存在，但在过去的50年里，它已在军用和商用计划中被大量制造出来。

其它更具放射性的致癌物质也确实存在，比如镭-226，但与钚-239不同，它们不能用以制造核武器，或者数量上无法利用。高浓铀也能用于制造核武器，但它的放射性比钚-239低大约1,000倍。钚-239一旦被移出安全、仪器齐全的设施，或一旦进入人体，就相对难以探测。钚的危险性由于这一事实而增大。这是因为钚-239放射出的伽马射线——提供探测放射性核素最容易的方法——相对微弱。

钚主要的致癌性质产生于它放射出大量的阿尔法辐射。质量重的阿尔法粒子将其能量转移给其它原子和分子所做的碰撞少于质量轻得多的电子，而后者是伽马和贝塔辐射造成辐射损伤的主要方式¹。阿尔法粒子在活性组织中只作短距离移动，反复轰击附近的细胞和组织。在与沉积在活性组织中的能量相同时，它造成的生物损伤大得多。

各种辐射造成生物损伤的相对有效性称作“相对生物有效性”(RBE)。它由于辐射种类、辐射能量以及被照射体器官的不同而不同。出于管理目的，用一称为“质量因子”的简单要素来表示阿尔法、贝塔、伽马和中子射线的相对危险程度。以伽马辐射为参照，国际防辐射委员会目

▲图中黑星显示的是，类人猿肺组织中的钚微粒释放阿尔法射线所留下的痕迹(经放大)。

前提议用质量因子20来表示阿尔法辐射²。

一旦进入人体，钚-239喜好沉积在软组织(尤其是肝脏)、骨头的表面、骨髓和骨头中其它未钙化部分、以及不含软骨的骨头区。沉积在骨髓的钚-239对在此进行的血液制造产生特别有害的影响。相反，另一种释放阿尔法射线的元素镭-226在化学性质上与钙相似，所以沉积在骨骼的钙化区域。

在人体外时，钚-239不及伽马辐射源危险。由于阿尔法粒子在近距离内转移其能量，靠近人体的钚-239实质上将其所有能量投射在皮肤较外面不会引起生物损伤的死皮层上。

由于钚-239衰变而释放出的伽马射线会渗入人体，但由于它们相对较少、也较微弱，伽马射线要产生(能造成)实质性(危害)的吸收剂量需要相当数量的钚-239。这样，钚-239可在安装了较少防护设备的情况下进行运输，而没有直接造成严重放射性后果的危险。钚-239对健康的最大危险来自通过呼吸让其进入人体。当它是常见的难溶的钚-239氧化物形态时，就更是如此。另一个危险是通过割伤和擦伤处让钚进入血流中。通过吞咽让钚进入人体(造成的)危险较由呼吸

使其进入人体的要低得多，因为钚不易被肠壁吸收，所以其大部分会被排出体外。

钚-239造成损伤的类型以及它造成这种损伤的可能性取决于钚进入人体的方式、钚的化学形态和钚颗粒的大小。对于社会成员来说，钚进入人体的通常方式是呼吸和吞咽。由于无意间吃了含钚的土壤，或通过饮食受污染的水和食物，钚得以进入人体。钚通过伤口进入人体主要是(过去)参与大气核试验项目的工人和人员的危险。

一般来说，与相同数量但分裂为较小颗粒的钚相比，大颗粒形态的钚产生生物损伤较小，因此引起疾病的危险也较小。当吸入大颗粒(钚)时，它们易被粘住在鼻毛上，这防止它们进入肺。较小颗粒(的钚)进入支气管并进入肺。它们可能在肺里沉积下来，辐射周围的组织。

以每单位放射性计算，其它放出阿尔法辐射的钚同位素，如钚-238，对健康的影响与钚-239相似。但是，每单位重量(产生的)的放射性随同位素的不同而不同。例如，每单位重量钚-238(产生的)的放射性比钚-239多大约270倍。

试验数据

钚对健康的影响主要通过对实验用动物做试验进行研究。也有些分析研究了受到钚污染的工人和非工人群体。以肺部或整个人体为计数器进行钚负荷测量，以及对受到钚污染的人士进行追踪检查所提供的信息，补充了试验数据和分析。美国过去还把钚注入人体做试验。在1945-1947年间，有18人在试验中被注入钚以获取钚代谢的数据。这些试验在未得到知情同意的情况下进行。自有关这些试

《能源与安全》

《能源与安全》是一份报导核不扩散、裁军和能源可持续性的时事通讯刊物，由能源与环境研究所(IER)一年发行4次。该刊物文章仅代表作者个人观点，不一定反映IER的主张。

IER地址：6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912, USA

电 话：(301) 270-5500

传 真：(301) 270-3029

INTERNET: ieer@iccer.org

万维网地址：<http://www.ieer.org>

能源与环境研究所就广泛的问题向公众和决策者提供有见地的、明确的和稳妥的科学和技术研究报告。该研究所旨在向公共政策事务提出科学的意见，以促进科学的民主化和更健康的环境。

能源与环境研究所成员：

所长：阿琼·麦克贾尼

执行主任：伯恩德·弗兰克

图书馆员：洛伊丝·查墨斯

工程师：马克·菲奥兰凡特

高级科学家：凯文·格尼

簿记员：戴安娜·科恩

项目科学家：安妮·麦克贾尼

对外协调员：帕特·奥特梅尔

全球协调员：妮塔·塞斯

行政助理：贝特西·瑟洛·希尔兹

感谢我们的支持者

我们衷心感谢我们的资助者，是他们的慷慨资助使我们能够进行自己的“核材料危险”全球计划。我们的资助者是W. Alton Jones Foundation, John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, C. S. Fund 和H.H. Foundation。

我们还要感谢我们的基层技术支援计划的资助者，该计划为我们的全球工作提供了广泛的帮助。该计划的资助者是Public Welfare Foundation, John Merck Fund, Ploughshares Fund, Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock, Rockefeller Financial Service, Stewart R. Mott Charitable Trust, Town Creek Foundation 和Belden II Fund。

本期刊物英文版的设计由华盛顿特区的Cutting Edge图象公司承担。照片由Atomic Photographers Guild的罗伯特·德尔·特里迪塞提供。

主管编辑：阿妮塔·塞斯

本期英文版于1997年7月出版。

验的情况于1993年被曝光以来，它们已成为许多批评的靶子。

对小猎兔犬所做的试验已经表明，很少量不溶形态的钚就有近百分之百的可能产生肺癌。把这一数据推及人类时，解出肺中钚负荷达到致命时的数额为约27微克。当然，这种由动物推及人类的方法有一定的不确定性。但是，这一假设，即几十微克钚-239存于肺中会大大提高患肺癌的风险，不会有错。较大量的钚在短期内也会引起健康问题。

对数量低得多的钚来说，其经精确量化的后果还不很清楚。这是出于几种因素，比如：

- 在人体中测量钚的困难；
- 在排泄率和排泄功能方面的不确定，因为人与人之间的排泄率相差很大(以致于人体中相同的钚负荷会产生相当不同的吸收剂量)；
- 使问题复杂化的因素，诸如吸烟等；
- 数据中的不确定性(例如，吞咽或吸入钚的时间)；
- 在进行研究的长时期内，受到其它很大程度上未知的致癌源(放射性和非放射性的)的影响；
- 对在核武器工厂接触钚的工人的健康在可能范围内进行研究和跟踪检查的失败。

用受到辐射的人类对象来分析微克数量钚所产生的影响只进行了没几次尝试，其中之一是对曼哈顿计划中于1944和1945年在制造第一枚核武器的洛斯·阿拉莫斯国家研究室受到钚辐射的26位“白人男性对象”进行的长期研究。这些受实验者被跟踪研究了很长时期，他们的健康状况被定期出版。最新结果刊载于1991年的一份研究报告³。

这些受实验者体内沉积的钚的数量估计在“最低为110底夸克(3毫微居里)……上至6960底夸克(188毫微居里)”⁴的范围内，其对应的重量范围是0.043微克至3微克。但是，这一研究中的不足使受到辐射时事实上进入人体的钚的数量和其溶解性有相当的不确定性⁵。

至1990年，有7人死亡，其中1人患的是骨癌(骨瘤)⁶。患骨癌在人类中不常见。对一组26人进行为期40年的观察，正常情况下，得骨癌的几率差不多是百分之一。这样，受到钚辐射的人(其吸收钚剂量低于目前防辐射指南规定的量)得这种病的机会相当可观。⁷

在其它国家，特别是俄罗斯，也有受到钚辐射的数据。对这些资料仍在进行评估。美俄正在辐射影响研究联合协调委员会下开展合作研究以评判马亚克厂对工人以及设施附近居民健康的影响。

¹ 伽马射线由高能光子组成，而后者是电磁能“包”或量子。

² 积淀于载体(每单位质量)上的能量以戈瑞或拉德为单位(1戈瑞=100拉德)测量，而生物损伤用西韦特或雷姆计量(1西韦特=100雷姆)。

³ G. L. 沃尔兹和J. N. P. 劳伦斯：《对曼哈顿计划中接触钚的工人进行的一项为期42年的医学跟踪研究》，《健康物理学》，第37卷，1991年，第445-485页。

⁴ 同上，第186页。

⁵ 此研究中这些问题在戈夫曼1981年的文章中(第510-520页)有比较详尽的讨论。(戈夫曼的文章的基础是沃尔兹1979年出版的有关曼哈顿计划工人的研究的情况)。J. W. 戈夫曼：《辐射和人类健康》(旧金山，Sierra Club Books出版社，1991年)，第516页。

⁶ 这些死亡病例中有3人患了肺癌。由于这3人都是烟民，很难判断这样大的死亡率有什么重要意义。

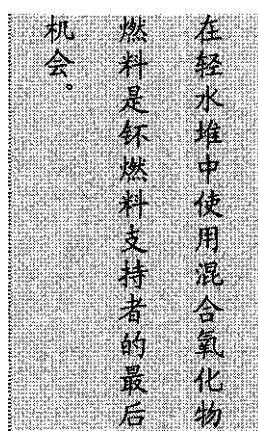
⁷ 沃尔兹，第189页。

混合氧化物在法国与比利时的使用

让-皮埃尔·莫里肖德

欧洲工业范围内首批混合氧化物的试验发生在1963年的比利时莫尔的BR3反应堆和1974年法-比边境的法国Chooz A反应堆(现已关闭)。这些试验是法-比混合氧化物早期发展的结果。比利时Belgonucléaire公司和法国COGEMA公司开始在比利时代瑟尔(1973年开始运行)和法国卡达拉克(1970年开始运行)的两座小厂中联合生产混合氧化物燃料。这两个厂的产量分别为每年35公吨和15公吨混合氧化物燃料。作为法-比合作的一部分,计划在比利时蒂昂和杜尔的4座压水堆和第一批28座于1980和1984年间开始运行的法国900兆瓦压水堆中使用混合氧化物燃料。它们有四根闲置的容器顶端导管,使用混合氧化物时被认为是必需的备用控制棒可以置于其中。让人费解的是,法国后来建造的22座1,300兆瓦反应堆都不适合使用混合氧化物。这可能是因为在为轻水堆发展混合氧化物的初次浪潮过后,为使用钚燃料,重点转向快中子堆(或“增殖”堆),而在轻水堆中使用混合氧化物降为次要。

直到1984年,在清楚了最初对增殖堆项目的希望不会实现后,Belgonucléaire公司和COGEMA公司才得以重组以在轻水堆中商业化混合氧化物。作为这些新努力的一大成



果,混合氧化物于1987年第一次被填入圣洛朗-德索(卢瓦尔地区)的法国反应堆。在每年更换52个燃料组件(整个堆芯的三分之一)中,有16个是混合氧化物。自那时起,另外9座反应堆也已被填充了至多达30%的混合氧化物。这是法国核安全官员在混合氧化物上所接受的最大填充值量,这些混合氧化物的钚含量不超过5.3%。在比利时,1993年12月议会争论的结果是,可有两座反应堆至多可将20%的堆芯以混合氧化物填装,但其钚含量可达7.7%。为轻水堆发展混合氧化物的第二次浪潮还导致在法国马库尔建造起一座称作“Melox”的新制造工厂,其年产量为115公吨。该厂于1990年获得建厂许可证,于1995年开始运行。据报道,它至1996年底已为法国EDF设施提供了96个混合氧化物组件。

法国28座900兆瓦的反应堆中只有16座在建造时获得接受混合氧化物的许可证。目前,(法国)公众正就可使卢瓦尔河边希农的另4座反应堆可以使用混合氧化物进行争论。这与政府关于由专家在1997年6月底之前进行一项使用混合氧化物的环境和经济评估的决定背道而驰。钚论坛也要求在1997年秋报道在希农进行公众调查的结果。

在法国,许多专家一直对使用混合氧化物燃料的防护、安全和经济性提出疑问。1990年11月决定建造Melox厂时,一位知名的核物理学家让-保罗·夏皮拉在*La Recherche*杂志上对使用混合氧化物的价值提出质疑¹。最近,GSIEN(核能信息科学家协会)的莫尼克·塞内在*Gazette Nucléaire*上表示,J.P.夏皮拉提出的反对意见已由EDF使用混合氧化物燃料组件得到证实²。

夏皮拉和塞内指出，与其取代的传统铀燃料相比，混合氧化物带来许多安全问题：燃料棒制造要更为精细以防止污染；尽管增加了控制棒，反应堆运行中失控的风险反而更大；释放出裂变气体；反应堆运行中燃料棒的腐蚀，等等。考虑到法国900兆瓦反应堆现正表现出的老化现象，这些复杂情况就更成问题。

伴随使用混合氧化物而来的安全问题与运输能用来制造核武器和其它发散放射性材料的武器的核原料有关。在法国，钚和混合氧化物燃料只在白天在警察护送下沿秘密路线从公路运输³。由于钚在拉阿格(西北的孔特廷地区)生产，而混合氧化物制造设施在比利时和法国的东南部，生产混合氧化物需要相当数量的钚运送。此外，沿分散在全法国和欧洲各处的路径来运输混合氧化物，为放射性污染生态系统提供了可能，而这种污染可能持续几千年⁴。再有，混合氧化物与可能是核工业中对环境最具危险性的活动——再处理乏燃料——的政策密切相关。最近在拉阿格和塞拉菲尔德附近进行的研究已经表明，许多健康和环境问题来自再处理。

当钚在拉阿格积聚(1995年底为36公吨)的同时，天然铀的价格在下降，而且通过再处理得到的铀也在增加。到1995年6月1日，在拉阿格已有7500公吨铀通过再处理乏燃料而获得，这一数量足够调制15,000个燃料组件。鉴于可以低价获得如此大量的铀，混合氧化物燃料在经济上无法同铀燃料竞争。即便将钚视为免费(获得)的，生产混合氧化物燃料也比铀燃料昂贵得多。如果把再处理的费用计算在内，混合氧化物在经济上之不可取就一清二楚了。

生产和储存混合氧化物只会提高成本，混合氧化物生产者也由此面临许多技术限制。

- 存在强阿尔法射线的释放和镅-241释放高放射性伽马射线；
- 在混合氧化物使用前为制造它而提取的钚只有2-3年有限的储存期(参见第19页)；
- 为了提高燃料棒可在反应堆中维持的时间——这正是EDF追求的——必须将燃料进一步浓缩：铀燃料只要4.2%，但混合氧化物需8%。目前法国允许(使用)的混合氧化物只含5.3%钚。它在每公吨重金属(消耗)期间产出30,000兆瓦·天的能量，而每吨铀燃料只能生产47,000兆瓦·天的能量。因此，EDF已要求授权将混合氧化物中的钚含量提高到7%(目前尚未成功)。
- 再处理混合氧化物燃料的实验已产生一种形式的钚，与经再处理提取的铀燃料相比，其裂变性较小(因此产生的能量较少)，但产生更多的超铀元素(这样，放射性较高)。1996年8月，EDF宣布它要储存混合氧化物乏燃料。因此，至目前为止，尚无如何处置混合氧化物乏燃料的政策。

总之，被有些人视为减少钚库存的方法的混合氧化物也有自己的问题。由于“增殖”反应堆的失败，对COGEMA公司内与铀支持者竞争的钚支持者来说，这是剩下的最后机会。但是，如果在钚工业已经糟透了环境利弊表上再加上其平庸的经济收支情况，钚在法国可能成为废物。因此，有此希望，即后代要管理的钚会比当前根据COGEMA公司再处理合同所预计的要少。

作者：

让-皮埃尔·莫里肖德是退休的物理-化学工程师，于1957年在Saclay研究中心开始其职业生涯。他从1992至1994年是一个反对Melex厂联盟的主席。目前他是法、比、瑞士一个联盟组织——钚论坛——的协调员。

¹ J. P. 夏皮拉，“*Une nouvelle stratégie pour le plutonium*,” *La recherche*, 第226期, 1990年11月。

² M. 塞内, “*Dossier MOX*,” *La Gazette Nucléaire*, 第155/156期, 1997年1月。

³ M. 帕瓦戈, J. 阿泽曼, M. 什内达: “*Les transports de l'industrie du plutonium en France*,” WISE-Paris, 1995年。

⁴ 《钚：核时代的致命黄金》，IPPNW/IEER, 1992年。

俄罗斯的混合氧化物燃料生产 状况与前景

阿纳托利·迪亚科夫

在俄罗斯，尽管系统的研究直到70年代初才起步，但以钚为核反应堆燃料的工作早在50年代就开始了。本研究主要讨论钚在快中子堆中的使用。

最早用于研究性快中子堆BR-5(BR-10)和BOR-60中的混合氧化物

燃料实验组件于70年代制造。混合氧化物燃料的实验组件也在通常使用高浓缩铀燃料的BN-350和BN-600快堆中试验。表1中显示的数据表示为俄罗斯实验用和工业用反应堆生产和填充的混合氧化物燃料的数量。总共已生产出超过2,000根燃料棒以在BN-350和BN-600反应堆中试验，其中达9-11%的裂变材料正被消耗。

在轻水堆中使用钚的研究只在最近才作为钚处置计划的一部分而开始，它也是快堆计划缺乏国家经济支

表1 俄罗斯生产混合氧化物的历史

制造程序	制造试验地	反应堆	组件数(钚的质量)
碾磨(丸)	季米特诺夫格勒(1970)	BOR-60(1973)	(几十千克)
热冶	季米特诺夫格勒(1970)	BOR-60(1975)	(几十千克)
沉淀碳酸盐(丸)	P0 马亚克(1980) 季米特诺夫格勒(1970)	BOR-60(1980)	(10千克)
等离子化学	莫斯科(1980)	BOR-60(1981)	2个燃料条 (约1千克)
碾磨(丸)	P0 马亚克(1980)	BN-350(1980)	10个燃料组件 (约80千克)
氯沉淀(丸)	P0 马亚克(1980)	BN-350(1992)	1个燃料组件 (约10千克)
氨沉淀(丸)	P0 马亚克(1980)	BN-600(1992)	8个燃料组件 (约80千克)
碾磨(丸)	P0 马亚克(1980)	BN-600(1990)	12个燃料组件 (约100千克)

持的一个结果。尽管正就VVER-1000反应堆使用混合氧化物燃料进行研究，而且这一研究的主要目的是在新型VVER-640(或NP-500)反应堆中使用混合氧化物，但尚未开始在工业用VVER-1000反应堆中进行试验。为产生实验数据和就使用混合氧化物燃料建立设计项目，已建造了一座特殊的试验设施。还有人建议在此设施中研究VVER反应堆使用铀-钚燃料组件时的燃料棒安置。在现有反应堆中使用全混合氧化物燃料组件的一项计划也正在开展。

现有的混合氧化物制造设施

在俄罗斯有两座用于混合氧化物燃料生产的试验厂：Paket厂和Granat厂，它们都座落于马亚克(车里雅宾斯克-65)。这两个厂按设计都使用武器级钚，并为快堆生产混合氧化物燃料。它们的生产能力不大——比较有限的单次加料为300克钚计，Granat厂每年可处理50千克钚(或，生产1公吨混合氧化物燃料)。Paket厂每年可处理100千克钚，或生产30-36个燃料组件，相当于1公吨钚含量为20%的混合氧化物燃料。

Paket厂于1980年启用。分开生产的铀和钚氧化物粉末在该设施中由机械混合在一起。下一步，在混合物中加入黏合剂，各种物质再次混合、颗粒化，并被压制成燃料丸。接着，烘干、熔结燃料丸。而后，测试燃料丸并准备外包层金属。将燃料丸置于圆柱中，再在圆柱外层包上金属，随后焊接燃料棒并进行测试。在去污染后，燃料棒被送至埃列克特罗斯塔厂，在那里生产燃料组件。俄罗斯专家相信，Paket厂也能被用来为热中子研究堆提供用武器钚生产的试验用燃料棒。

于1988年初开始运行的Granat设施被用于为快堆生产颗粒化的混合氧化物燃料。其使用的钚来自快堆乏燃料再处理后的钚或武器用钚，钚的浓度达25%。该设施目前由于安全原因停止运行。

这一设施由14个手套盒组成。Granat厂中的混合氧化物燃料生产技术基于硝酸溶剂中的铀和钚沉淀。由此产生的颗粒非常干燥，在处理时几乎不产生粉尘。这些颗粒然后被送至Paket厂制成燃料丸和燃料棒。

“Complex-300”厂的建设于1984年开始，它被设计用来为快堆准备燃料棒。该厂的生产能力是每年30公吨混合氧化物。由于BN-800反应堆建设的拖延，该厂的工程于1989年停止。该厂有一排房间被设计用来安置以混合氧化物颗粒制造燃料棒的生产线。该厂已有一整套生产设备，但尚未装配。Complex-300的混合氧化物生产技术与Paket厂的相同。然而，由于Complex-300(与Paket厂不同)按设计也使用反应堆级钚，它配备了带防护罩的盒子和操作器。

Complex-300厂停工的一个后果是此建筑和装配设施的状况恶化。总的来说，由于这一设计中提出的技术方案没有西方相似的混合氧化物生产设施先进，俄罗斯专家对是否需继续建造该厂表示怀疑。

由于Complex-300被设计用来为快堆制造燃料丸，而这种燃料丸与为热堆制造的燃料丸又有许多不同，Complex-300厂将不可能为使用军用钚的热堆生产混合氧化物燃料。此外，装配设备也不是设计用来处理军用钚的。

目前，为利用西方的经验和技术，俄罗斯正与德、法密切合作以研

制混合氧化物燃料生产的试验厂。正在考虑两种设计。第一是“Tomox 1300”设施的技术，在法-俄联合AIDAMOX项目中被指定用来每年把1300千克武器钚转化为混合氧化物燃料。这一设施的总生产能力为每年30公吨混合氧化物燃料。德-俄联合研究项目建议的一座试验厂，其能力为每年可转化1公吨武器级钚，这相当于生产10公吨含钚量最多达15%的轻水反应堆燃料。这些初步研究现已完成，目前三方正在商量该厂的厂址和经费落实。据估计，成本约1.3亿美元。要判断这种试验厂可否用于生产

钚含量达45%的用于快中子堆的混合氧化物燃料，尚需进一步的研究。

作者：

阿纳托利·迪亚科夫是莫斯科物理与技术研究所的物理教授。1990年，他与弗兰克·冯·希波教授一起在莫斯科物理与技术研究所建立起军控、能源与环境研究中心。迪亚科夫博士目前的活动包括就俄罗斯武器级钚处置、透明度和核军备削减的不可逆特性进行研究。

科学为大众

钚怎样随时间而变化

典型的钚样品不是纯的钚-239，而是由各种钚的同位素混合组成。钚有15种同位素，质量数范围从232到246。它们都有放射性——就是说，它们的核会衰变，并在此过程中形成新元素。钚同位素衰变的所有产物都有放射性。因此，每一种钚同位素形成一条衰变链。表2显示的是简化了的钚-239的衰变链。

通常在由核反应堆造出的钚的同位素，其范围从钚-238至钚-242。军用或商用反应堆中产生的除钚-239以外的同位素的数量，取决于使用燃料的性质、反应堆的设计和燃料受辐照时间的长短。

表3显示了钚同位素混合物两种最常见的形式。第一种是武器级钚(通常缩写为WPu)，它包含了93%或更多的钚-239。另一种是典型的反应堆级钚(经常缩写为RPu)，如产自轻水型核动力反应堆的钚。请注意，来

“科学为大众”将成为《能源与安全》的固定栏目。它将为读者提供本期讨论中与政策问题相关的技术背景，并提供你测试自己对这些技术问题理解程度的机会。请注意，在表2中有几个空缺的数值。根据文中提供的信息来填写。答案在下期内找。

自轻水堆的反应堆级钚通常包含超过20%的钚-240和超过10%的钚-241。在其它反应堆中产生的钚，例如以石墨调制反应堆(其中有些在英国、俄罗斯和其它地方运行)，或在加拿大和其它地方使用的重水堆，它所含的钚的不同同位素的组成，介于表3所显示的两种情形之间。表3还给出了大多数常态钚同位素的半衰期和特殊活动。半衰期指某一样本中的原子分裂掉一半所需的时间。特别活动(反过来又与半衰期有关)表明了一定量物质的放射性。

武器级和反应堆级钚都含有一定量的钚-241。钚-241通过放射出一个贝塔粒子而衰变为镅-241。由于镅-241的半衰期(432年)比钚-241(14.4年)长得多，作为钚-241的衰变物，它集结起来。镅-241衰变放出的伽马射线比钚-239的更强，它在钚样品的寿命期内不断增强。因此，钚-241越多，样品时间越久，随镅-241不断积累而从中释放出的伽马射线也就越多。

由于反应堆级钚含有相当量的钚-241，样品时间越久，操作工人所受的辐射就越多。当一些国家用轻水堆乏燃料分离出的钚制造混合氧化物燃料时，放置时间久的钚样品对混合氧化物制造厂的工人产生更多的放射剂量。较老的混合氧化物工厂，被设计用来处理经再处理(消除乏燃料中存在的镅同位素)还不到2年的反应堆级钚。新造的混合氧化物厂能处理经再处理已有约3年的钚。这样，象日、俄这样不使用反应堆级钚、但已将其分离和储存了许多年的国家已浪费了一大笔钱，因为置放时间越久的钚越可能需要再进行再处理以消除镅-241。因此，即便对混合氧化物的支持者来说，在钚事实上被制成燃料之前的合理时间内才进行再处理，才是经济上的谨慎之举。

表4显示的是，在再处理含有1克钚-241的200克反应堆级钚样品时，镅-241是怎样积聚起来的。它为读者留下了一个空列去填，以此来加深您的技术技巧。请注意，钚-241的半衰期是14.4年，钚-241在每经过一个半衰期后有一半衰变为镅-241。由于与432年的半衰期相比28.8年太短，我们为简化起见可忽略镅-241的衰变。

表2
钚-239衰变系列的主要子支

钚-239	半衰期：24,110年
□ 阿尔法衰变	
铀-235	半衰期：704,000,000年
□ 阿尔法衰变	
钍-231	半衰期：25.2小时
□ 贝塔衰变	
镤-231	半衰期：32,700年
□ 阿尔法衰变	
锕-227	半衰期：21.8年
□ 贝塔衰变	
钍-227	半衰期：18.72天
□ 阿尔法衰变	
镤-223	半衰期：11.43天
□ 阿尔法衰变	
氡-219	半衰期：3.96秒
□ 阿尔法衰变	
钋-215	半衰期：1.78毫秒
□ 阿尔法衰变	
铅-211	半衰期：36.1分
□ 贝塔衰变	
铋-211	半衰期：2.15分
□ 阿尔法衰变	
铊-207	半衰期：4.77分
□ 贝塔衰变	
铅-207	半衰期：稳定

半衰期的数据来自《CRC化学和物理手册》，1988年。

表3

钚同位素	半衰期 (年)	特别活动 (居里/克)	武器级钚 中的数量 (%)	反应堆级钚 中的数量 ¹ (%)
钚-238	87,74	17.3	-	1.3
钚-239	24,110	0.063	93.0	56.6
钚-240	6,537	0.23	6.5	23.2
钚-241	14.4	104	0.5	13.9
钚-242	379,000	.004	-	4.9

¹ 这一竖列的数据反映了典型的压水堆的情形。压水堆是国际上所运行的最常见的核反应堆。

表4

同位素	初始成分	2年后	5年后	14.4年后	28.8年后
钚-241	1	0.91	?	0.5	?
镅-241	0	0.09	?	0.6	?