

## 作为能源资源的钚：商用前景分析

随着民用钚存量的增加，如何使用和管理这些库存正在成为国际关注的问题

Pierre M. Chantoin  
和  
James Finucane

**钚**是核反应堆运行期间堆燃料中形成的一种元素。尽管钚能被分离、贮存以及重新用于核动力厂的返回燃料中，然而钚作为武器材料的众所周知的军事用途使之成为一个敏感问题。

本文只讨论与钚作为能源资源在民用核部门应用有关的一些重要问题，不涉及与军事有关的发展。所讨论的专题包括：钚在核燃料中的形成，钚在后处理过程中的分离，以及钚在特定形式核燃料——铀和钚的混合氧化物燃料(MOX)——中的再利用(回用)。此外还讨论世界民用库中钚的预计积累，和 IAEA 在帮助确保这些钚能被安全地处理、运输、贮存和管理方面可起哪些作用。预计发生在今后 10 至 30 年内的钚的一时性积累，是各国推迟执行建造使用钚的快中子增殖堆(FBR)的国家计划的一个结果。这种一时性积累的持续时间，主要取决于是否有足够的可为当今运行和建造中的主流核动力堆即轻水堆制造 MOX 燃料的设施。

### 在核燃料中形成的钚

在今后 15—20 年，全世界的核动力厂将产生出大量的钚，使钚库存量进一步增加。(见第 41 页图。)1965 年产生的钚不到 1 吨。到 1992 年，随着大量核电厂投入运行，产生的钚已达 50 吨(含在约 9000 吨乏

燃料中)。核动力商业发电开始以来，乏燃料中已积累约 600 吨钚。到 2005 和 2010 年，预计钚累积量将分别达到 1000 吨和 1500 吨。\* 因为 1 吨易裂变钚在理论上约有约相当于 2200 万兆瓦时电力的能量，一些国家已选定对这种乏燃料进行后处理的方案。对乏燃料进行化学处理(后处理)，以提取钚，然后将钚制成适于在堆中应用的 MOX 燃料。从乏燃料后处理中回收的钚，其质量主要取决于反应堆类型和运行期间的燃料利用程度(燃耗深度)。

### 燃料后处理或贮存

后处理是可以商业规模利用的成熟技术。(见表。)1992 年，对所有类型燃料的总后处理能力估计为 4015 吨重金属(tHM)。这一能力只能满足动力堆卸出燃料的 40% 的后处理要求。运行中的后处理厂均采用先进的普雷克斯技术。在较高燃耗(高达 45 兆瓦日/千克重金属)或 MOX 燃料处理中，预计不会有大的问题。

有些国家正在扩大后处理能力。法国正在改造 UP-2 后处理工厂，以将其年处理能力翻番到 800 tHM。现计划于 1994 或 1995 年，使 UP-2 工厂以翻番后的处理能

\* 此处钚估计数字是用 IAEA 核燃料循环和废物管理处运行的 CYBA 计算机程序进行的多次计算的结果。这些计算所依据的是电力生产和有关一些各种在役堆型的燃料和反应堆管理的一般模型。

Chantoin 先生和 Finucane 先生是 IAEA 核燃料循环和废物管理处职员。

世界现有和预计核燃料后处理能力

	燃料类型	1992年	预 计			
			1995年	2000年	2005年	2010年
法国	GCR	600	600	0	0	0
	LWR	1200	1600	1600	1600	1600
	FBR	5	5	5	5	5
印度	PHWR,RR	200	200	600	600	600
日本	LWR	100	100	900	900	900
俄罗斯	LWR	400	400	400	400	400
联合王国	GCR	1500	1500	1500	1500	1500
	LWR	0	1200	1200	1200	1200
	FBR	10	10	10	10	10
<b>总计</b>		<b>4015</b>	<b>5615</b>	<b>6215</b>	<b>6215</b>	<b>6215</b>

注：表中数据单位为吨重金属/年。GCR=气冷堆。LWR=轻水堆。FBR=快中子增殖堆。印度塔拉普尔厂是加压重水反应堆(PHWR)，特朗贝是一座研究堆(RR)。在俄罗斯，一座年处理能力为1500吨重金属的后处理厂的完工日期已推迟。

力重新投产。联合王国设在塞拉菲尔德的热氧化物后处理工厂(THORP)的建造工作已经完成。运行应于1992年12月开始,但已因一些与场址许可证颁发有关的问题而一再推迟。日本的年设计能力为800 tHM的六所村后处理工厂的建造工作,已于1993年4月开始,定于2000年完工。

截至1992年底,已被后处理的商用堆乏燃料总量约为46 000 tHM。其中34 000 tHM来自气冷堆,11 700 tHM来自轻水堆,40 tHM来自快堆。

预测的后处理能力——取决于未来对后处理服务的需求——预计到本世纪末之前将一直增长,然后保持稳定。(见表。)已经证明的普雷克斯技术,尽管可能要做一些改动和改进,但不大可能被替代或做根本改变。后处理的主要发展可能是减少基建费用和运行费用、减少废物和提高自动化程度。

现有设施	1992年按燃料类型分别的处理能力			
	GCR	LWR	FBR	其它
马尔库尔 UP-1(法国)	600			
阿格 UP-2(法国)		400		
阿格 UP-3(法国)		800		
马尔库尔 APM(法国)			5	
塔拉普尔(印度)				150
特朗贝(印度)				50
东海(日本)		100		
克什特姆(俄罗斯)		400		
塞拉菲尔德(联合王国)	1500			
当里(联合王国)			10	
<b>总计</b>	<b>2100</b>	<b>1700</b>	<b>15</b>	<b>200</b>

已分离铀的积累

1992年底,根据IAEA成员国向IAEA报告的数据,全世界来自民用核动力计划的已分离铀的总存量估计为86吨。



塞拉菲尔德工厂内的乏燃料。(来源:BNFL)

国家	供应者	制造能力	现状
比利时	比利时核子公司	35	运行中
	比利时核子公司	40	已规划
法国	法国核材料总公司	15	运行中
	法马通—法国核材料总公司	120	建造中
德国	西门子	25	临时停产
	西门子	120	90%完成
日本	动力堆与核燃料开发事业团	10	运行中
	动力堆与核燃料开发事业团	40	已规划
联合王国	英国核燃料公司	8	建造中
	英国核燃料公司	100	已规划

注：表中数据单位为：吨重金属/年。制造能力一栏，除日本动力堆与核燃料开发事业团(PNC)制造的 MOX 燃料的铀含量是 2% 外，其余均假定为 4.5%。

### 1992 年轻水堆 MOX 制造能力

为估计未来铀存量，IAEA 探讨了两种情景。（见第 41 页方框和图。）在根据各国的后处理政策设想的第一种情景中，直到 2000 年前后铀的分离速度将继续大于铀的利用速度。到 2000 年，估计铀存量将约为 170 吨。2000 年以后，铀存量将以 7—10 吨/年的速率减少。

根据 IAEA 成员国报告的数据设想第二种情景将产生与第一种情况稍有不同的结果。这种情景假设，所有已计划的后处理工厂和 MOX 工厂都将按时以全部生产能力运行。在这种场合下，铀存量将一直增加到 1997 年，达到约 120 吨。2000 年以后，预计的铀存量将以 20 吨/年的速率减少。

### MOX 燃料技术

经验表明，可以用铀作为一种原材料，来制造可为水慢化动力堆用的混合氧化物燃料。明确地说，MOX 燃料可用于居当今世界运行反应堆多数的轻水堆(LWR)。几个国家已经制订使用 MOX 燃料的计划。一些 MOX 燃料制造设施已在比利时、法国、德国和日本成功地运行。另一些设施正在建造或规划中。（见表。）

良好性能已在试验组件上得到证实的 MOX 燃料，正在被辐照到愈来愈高的燃

耗。MOX 燃料的经济可行性取决于铀及其浓缩价格与加工、后处理、废物管理、燃料贮存等费用间的平衡。

**MOX 燃料性能。**有关使用 MOX 燃料的试验，已在比利时、法国、德国和日本进行 20 多年。结果表明，MOX 燃料可安全地用于现有轻水堆。在堆芯中 MOX 装料高达 30% 的情况下，也无需对反应堆控制系统进行大的改动。试验表明，在迄今达到的燃耗范围内，MOX 与二氧化铀燃料在裂变产物和热—机械性能方面不存在大的差异。然而这两种燃料在燃料性质、中子能谱、燃料温度分布等方面有差异。因此，正在对燃耗超过 35 兆瓦日/千克重金属 (MWd/kgHM) 的试验组件进行进一步的实验和观察，以确信在更高燃耗下不出现负效应。

法国、德国和日本正在改进堆芯布置，以便把 MOX 燃料装料量提高到 50%—100%。然而这样的装料量，只有在新一代水堆中或对现有反应堆控制系统做大的改动之后才能实现。

德国已为沸水堆和压水堆设计和制造了多种 MOX 燃料组件。哈瑙设施已制造共含易裂变铀 5.8 吨的各种类型 MOX 燃料组件。在哈瑙，一座新的商用 MOX 燃料制造工厂已经建成，但一些政治问题已使它推迟投产。预计在 2000 年之前其年生产能力将逐步提高到 120 吨。德国进行的试验包括，对装入 6 座压水堆和 3 座沸水堆中的 490 个组件共计 70 000 根燃料棒进行辐照。所达到的最高芯块燃耗为 53 MWd/kgHM。

在法国，16 座压水堆已获准使用 MOX 燃料，并已向 7 座不同反应堆提供 410 个作了设计改进的 MOX 燃料组件。最大组件燃耗约为 39 MWd/kgHM，最大燃料棒燃耗为 47 MWd/kgHM。所有已完成辐照循环的组件，其性能都达到了预期的要求而且没有一根燃料棒出现泄漏。此外在最近几年里，主要在比利时制造的 60 000 多根燃料棒，也没出现问题。

在日本，铀和钚在热堆中的回用被认为是商用快中子增殖堆到来之前的最佳选

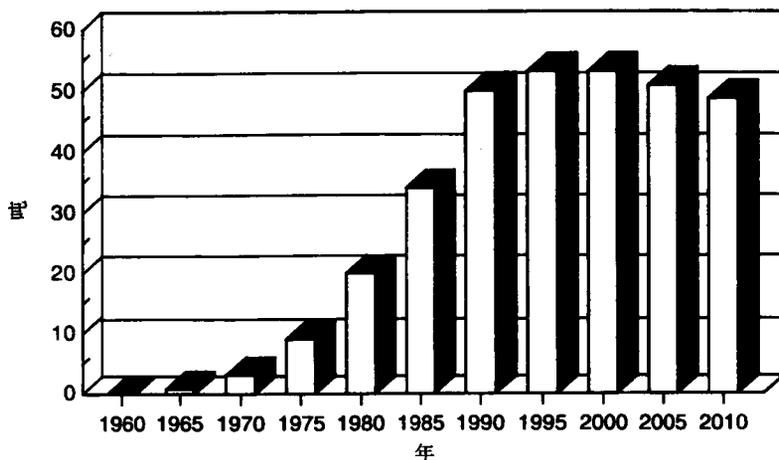
### 铀供应预测

IAEA 的一份关于未来几十年铀库存发展趋势的分析报告表明,估计量受着若干大的不确定因素的影响。根据对各国核政策和计划的不同假设,预测了两种情景。(见右图。)

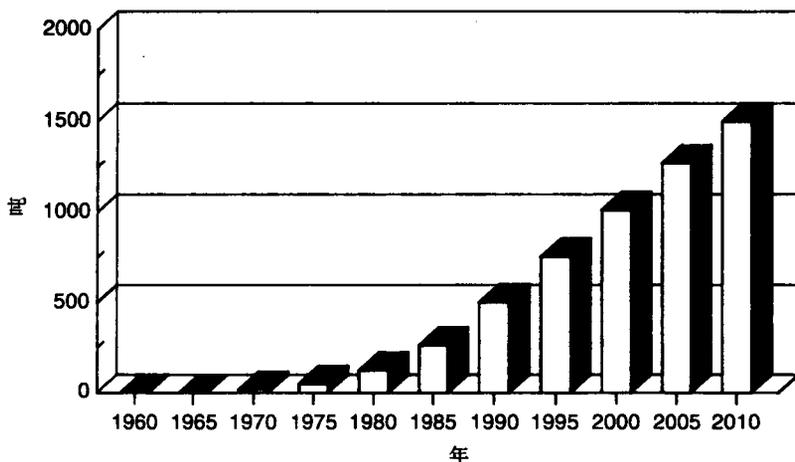
● 在第一种情景中,预计铀库存将在 2000 年之后逐渐减少。这种情景考虑了各国的后处理政策,评价了可能的 MOX 制造能力。在对 MOX 的评价方面,只考虑了确认的合同和项目。没有考虑法国 MOX 工厂的扩大。至于联合王国,假设将再建年制造能力为 50 吨的设施,并且只有在德国终止回用政策的情况下才会将其年制造能力提高到 100 吨。这里未考虑 MOX 工厂的工作存量(相当于约 3 个月名义用量或 3-4 吨铀)。所有这些假设综合起来,使第一种情景成为一种“高”积累情景。因为这些预计中的一个重要的不确定因素是目前正在审查的德国的政策。曾进行一项敏感性分析,其中假定德国政策转向直接处置、哈瑞 MOX 工厂不运行、德国于 1994 年停止后处理。在这种情况下,铀的生产和利用速度都下降了,但对世界范围总的铀积累没有明显影响。

● 在第二种情景中,预计积累将在约 10 年后消失。这种情景考虑各后处理工厂将一直以全部生产能力运行,所有建议的 MOX 工厂项目都将按目前规定的日期投入运行。这些考虑还有几点需要说明:1)关于后处理工厂以全部生产能力运行和及时建成 MOX 工厂的假设可能是乐观的;2)根据现有的合同,不能保证在 2000 年之后各后处理工厂以全部生产能力运行;以及 3)在 MOX 设施不能马上准备好的情况下,由于存在与分离铀的放射性积累和铀贮存相关的问题,各电力公司也许希望推迟后处理。所有这些假设综合起来,使第二种情景成为一种“低”积累情景。实际情景很可能介于这两种极端情景之间。

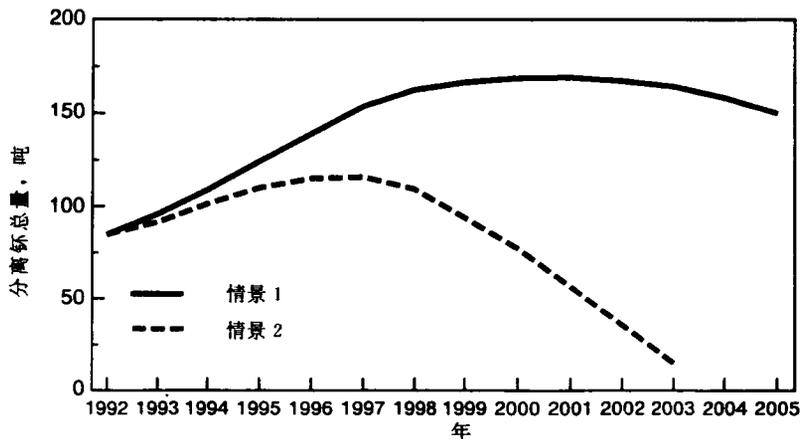
每年乏燃料中易裂变铀量



乏燃料中易裂变铀积累量



年底预计民用铀库存总量



择。日本已决定使用其在欧洲后处理中回收的铀,在欧洲制成 MOX 燃料。将来,从国内后处理中回收的铀,将供日本一家已计划建造的 MOX 设施使用。生产的铀将用在快堆和先进热堆上。然而,大部分铀将回用于轻水堆中。装入几座压水堆的 4 个 MOX 燃料组件和装入 2 座沸水堆的 2 个燃料组件,目前已以优异的性能满了寿期。(见本期有关日本核燃料循环政策的文章。)

在使用比利时制造的压水堆 MOX 的实验中,目前的燃耗已高达 70 MWd/kgHM,沸水堆 MOX 已达到 49 MWd/kgHM。燃料性能已经达到预定指标。在 3 座沸水堆和 10 座压水堆上,装入的 620 个燃料组件共计 100 000 根 MOX 燃料棒已经受辐照。1980 年以来仅有的几次故障是堆芯熔融塌落导致的磨损的结果,装在一起的一般铀燃料组件也曾受到了影响。

**MOX 燃料开发。**混合氧化物燃料目前已能在商业上站住脚,并在核燃料工业中起着重要作用。比利时、法国、德国、日本、俄罗斯和联合王国,已经建造或计划建造 MOX 燃料设施。比利时打算于 90 年代中期,开始在其核电厂中使用 MOX 燃料。法国计划到 2000 年,使装 MOX 燃料的反应堆达到 16 座。根据计划,马尔库尔 MELOX 工厂将从 1995 年开始为法国电力公司制造 MOX 燃料。在德国,已有 7 座反应堆装入 MOX 燃料,预计到 2000 年装 MOX 燃料的反应堆将增至约 20 座。这些反应堆所用的 MOX 燃料组件大部分将在哈瑙制造,其余的将由比利时核子公司建在比利时德塞尔的工厂提供。

在日本,在轻水堆上做大规模论证和商业应用之前,正在执行一些小规模计划。大规模论证(分别在 1 座沸水堆和 1 座压水堆中装入 1/4 堆芯的 MOX 燃料)定于 90 年代中期进行。MOX 燃料的商业应用(分别在 5 座沸水堆和 5 座压水堆中装入 1/3 堆芯的 MOX 燃料)计划于 90 年代末开始。

俄罗斯由于快堆部署已被推迟,正在开发将铀回用于热堆的技术。一座新的 MOX 燃料制造工厂,现正在南乌拉尔的车

里雅宾斯克综合企业建造。这座年生产能力为 60 吨重金属的工厂,将制造快堆用 MOX 燃料。然而,它也将被改造成能够生产 VVER-1000 型热堆用 MOX 燃料。(见本期有关俄罗斯核燃料循环政策的文章。)

瑞士目前在贝茨瑙的 2 套机组中使用 MOX 燃料,90 年代中期将有 1 家或 2 家瑞士电力公司开始将铀回用到别的轻水堆中。所用的 MOX 燃料,将由比利时核子公司和英国核燃料公司制造。

从研究和开发的角度看,MOX 燃料将继续受到电力公司的特别注意。将在反应堆正常和异常工况下,以及更宽的燃耗范围内,对辐照期间的 MOX 燃料行为作进一步研究。这项工作正在进行,以便解决 MOX 燃料与一般铀燃料之间的差异可能引起的任何技术和运行问题(例如,与温度和裂变气体释放有关的问题)。在这类研究中,还将解决设计发生变化带来的新问题。

法国和德国已经同意合作设计新一代水堆,以改进铀的回用。由于商用快堆的开发已被推迟,在热堆中烧铀成为目前利用后处理过程中回收的易裂变材料的唯一出路。

## 未来供应的安全管理

随着分离的铀的预计库存量的增长,人们将必须找到安全贮存、管理和使用它们的办法。几个国家在铀的处理、运输和贮存方面已有很好的经验。

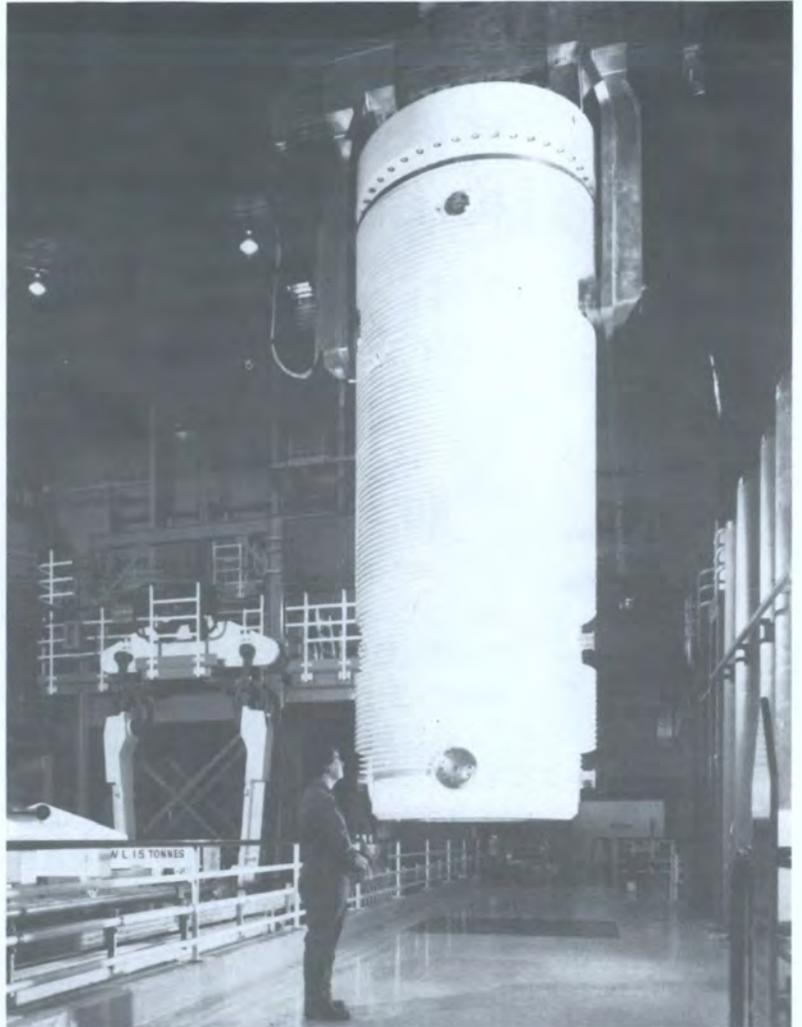
今后几年,IAEA 在促进与铀有关问题上的更大和更有效的国际合作方面,有若干可起的作用。例如,审查各国的经验,以确定可在其中做出改进的领域和提出一系列有关实物保护、临界和保健物理等问题的建议。然后,可将一系列这些信息,以关于质量保证和安全标准的安全文件的形式发表。此外,IAEA 可能在指导和监督将提出的国际建议的实施方面起更大的作用。

关于工业开发,IAEA 可以推进各国之间的交流,以促进混合氧化物燃料的研究和开发工作。目前一个限制 MOX 燃料使用

的因素是燃料加工能力有限。另一个限制因素是装入堆芯的 MOX 燃料的比例比较低。当前,在不改变堆芯结构的前提下,装入 30% 的 MOX 燃料是可能的。然而,研究表明,如果要想把这一数字增加到 100%,就必须改动堆芯结构,和增加控制棒的数目。

IAEA 将继续追踪钚存量,以尽可能地减少预计和评估未来钚积累的不确定因素。2000 年以前,来自民用后处理的预计钚存量将不断增加;之后预计它们将减少。具体钚积累增加多少——以及在哪一段时间内增加——将受多个大的不确定因素的影响。这些问题的答案,在很大程度上取决于对后处理能力和 MOX 燃料制造设施的生产能力与投入使用日期等做怎样的假设。如果除目前已规划设施外不再建造新的设施,要把钚积累再吸收到燃料循环中去,将需要约 20 年时间。

鉴于钚的供应不断增加及其可能用于武器,人们愈来愈希望建立一个国际体系,以便安全地管理和保障民用库存钚。据认为这样一个 IAEA 将在其中起重要作用的体系,可以为公众提供有关钚库存得到适当保障和安全管理保证。□



联合王国的接受并处理乏燃料的塞拉菲尔德工厂内景。(来源:BNFL)