

俄罗斯的核燃料循环：工业前景

核燃料生产和后处理及铀利用方面的政策、计划和经验综述

Yu. K. Bibilashvili
和
F. G. Reshetnikov

从一开始，前苏联的核动力发展就是以闭式燃料循环为基础的。其计划包括核电厂乏燃料的后处理，以及将回收的铀和钚回用于新生产的燃料元件中。这一政策一直没有大的变化，而且目前还包括了正在计划建造的新一代反应堆。

在俄罗斯和独联体(CIS)及东欧的一些国家，目前需要提供核燃料循环服务的有正在运行的 62 座核电厂，其反应堆均由前苏联设计。其中 45 座是压水堆，即所谓 WWER。在这 45 座压水堆中，装机容量为 1000 MW 的有 19 座，440 MW 的有 26 座。其余的为 15 座压力管式石墨慢化反应堆(即 RBMK)和 2 座快中子增殖堆(即 BN)。

本文从技术和工业角度评述俄罗斯的核燃料循环工业，特别侧重于后处理经验和计划；WWER、RBMK 和快堆用燃料制备；乏燃料管理；以及在俄罗斯核动力堆中使用混合氧化物燃料(MOX)的目前情况和前景。

乏燃料的后处理

所有 WWER 和 BN 反应堆的乏燃料均采用后处理方案，而 RBMK 堆的乏燃料不进行后处理，它的乏燃料被贮存起来。

对 RBMK-1000 型和 RBMK-1500 型堆的乏燃料不作后处理的决定主要是出于

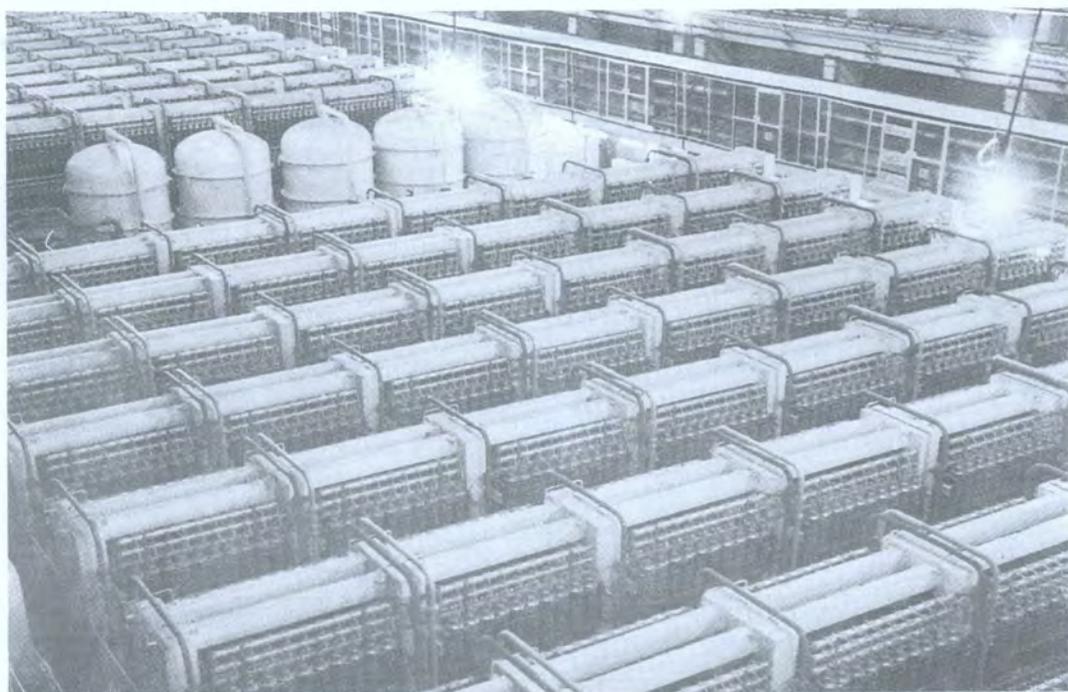
经济考虑。由于这种乏燃料的铀和钚裂变同位素含量低，因此要对其进行后处理是不经济的。RBMK 反应堆的乏燃料被置于密封的金属容器内，并存放在核电厂内的贮存能力约为 2000 吨重金属(tHM)的设施中。

对于其它类型的燃料，有一座后处理厂在运行，另一座正在建造。

● 车里雅宾斯克 RT-1 厂。该厂是位于“马亚克”的联合企业，于 1971 年投入运行，用于后处理 WWER-440 型反应堆、快堆和破冰船与潜水艇推进用反应堆的乏燃料。该厂主要堆型的燃料(WWER-440 型燃料)的后处理能力为 400 tHM/年。它采用以碳氢化合物为稀释剂以磷酸三丁酯为萃取剂的水萃取技术。萃取在能够实现机械相混合和脉冲相混合的多级萃取器中进行。高放裂变产物的净化系数在 10^6 和 10^9 之间，此净化系数能保证生产纯铀、钚及镅。采用这种技术，还可从乏燃料中提取铯-90，铯-137，锝-99 和其它放射性核素。

后处理以后，回收的铀可重新用于燃料元件生产。该厂的最终铀产品是铀-235 浓度符合要求的六水合硝酸铀酰熔饼。此熔饼是将铀的反萃取液和高浓缩铀溶液混合并浓缩后而得的。将溶液调整到合适浓缩度的工作，也可在哈萨克斯坦的生产燃料芯块的奥斯特-卡缅诺戈尔斯克工厂进行。目前从 RT-1 厂所得的多数熔饼的铀-235 浓度为 2%—2.5%，用于生产 RBMK-1000 型堆的燃料芯块。现在正进

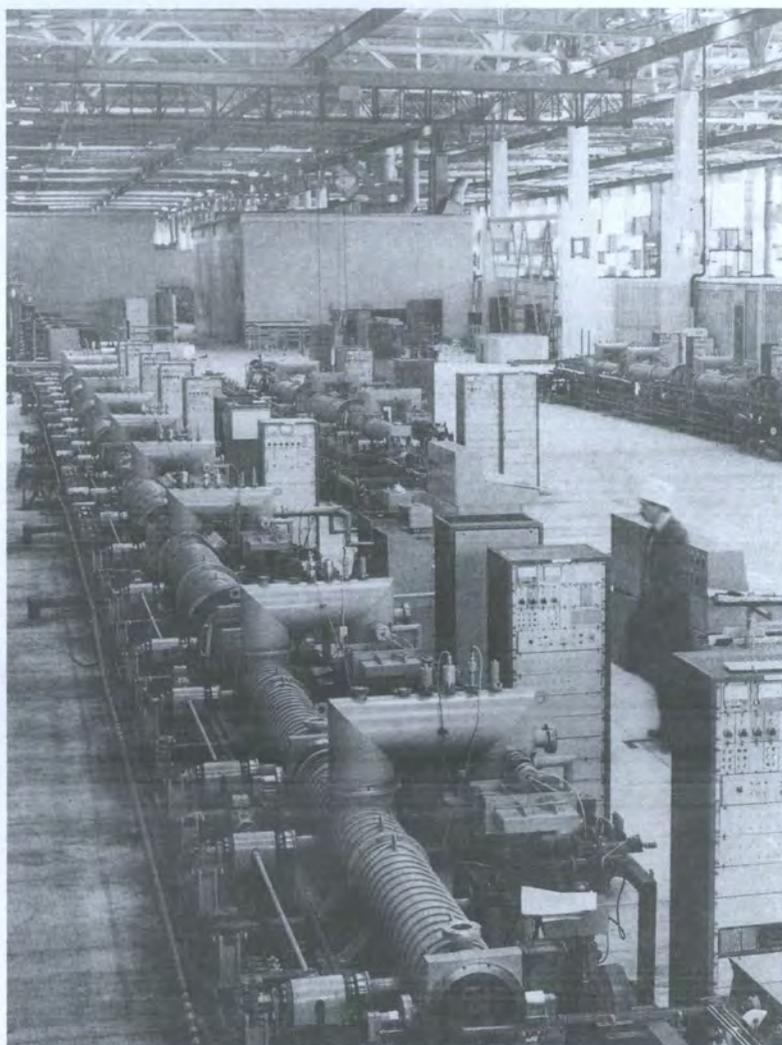
Bibilashvili 先生是俄罗斯联邦原子能部无机材料科学研究所副所长。Reshetnikov 先生是该所前副所长，现为高级顾问。



下图：莫斯科附近的埃列克特罗斯塔尔生产厂的 WWER-440 型堆燃料组件自动化生产线。左图：克拉斯诺雅尔斯克铀浓缩厂的离心机。（来源：Minatom, Russian Federation）

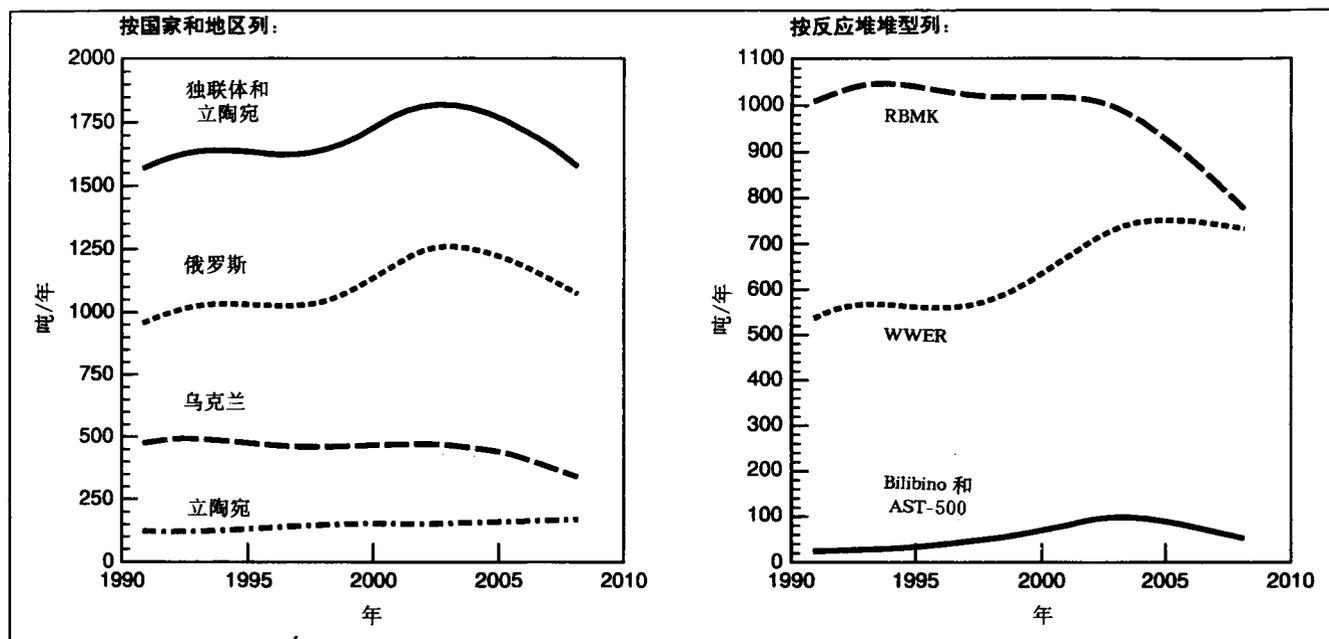
行工作，以便将回收的铀回用于立陶宛伊格纳林纳核电厂 RBMK-1500 型反应堆的燃料循环中，和 BN 与 WWER 型反应堆的燃料循环中。在 RT-1 厂获得的铀，暂以二氧化铀形式贮存在厂区。

● 正在克拉斯诺雅尔斯克建造的 RT-2 厂。正在建造的该厂主要用于后处理 WWER-1000 型反应堆的核燃料，将按计划投入运营。其第一条生产线将能每年后处理多达 1000 - 1500 tHM 的来自 WWER-1000 型堆乏燃料。同 RT-1 厂一样，其最终铀产品也将是六水合硝酸铀酰熔饼。它将首先被转化为六氟化铀，然后进入同位素浓缩工厂。在第一条生产线投入运行之前，WWER-1000 型反应堆的乏燃料将贮存在 RT-2 厂已经建成的一个中央设施内。这个贮存设施的设计容量为 6000 tHM，到 2005 年将全部被存满。目前的贮存容量是 3000 tHM。



燃料浓缩和制造

WWER 型反应堆的核燃料需求量，目前决定着燃料元件生产的规模。（见图。）所有这些反应堆均使用浓缩铀燃料（俄罗斯



1990—2010年水冷堆燃料需求量

没有以天然铀作燃料的反应堆)。

俄罗斯有若干铀浓缩厂和燃料制造厂在运行。

● **铀浓缩厂。** 俄罗斯第一座铀浓缩厂于1949年在斯维德洛夫斯克投入运行。之后在托木斯克、安加尔斯克和克拉斯诺雅尔斯克又有3座铀浓缩厂投入运行。这4座工厂都采用气体扩散法。50年代初,开始研究使用气体离心机的革新的浓缩方法。1964年,世界第一座用气体离心机装备的工业规模的铀浓缩厂在斯维德洛夫斯克投入运行。此后气体离心机也引入其它3座

铀浓缩厂。向气体离心法的过渡,使这些工厂的分离能力增加了1.4倍,并使电力消耗降至原来的1/8.2。目前,系列生产用的是第5代气体离心机。这种离心机的分离功单位的比能耗率为气体扩散法的1/25。

在这种浓缩工艺中,可用两种方法获得用于铀浓缩的六氟化铀——用氟气直接氟化铀的氧化物,或是将四氟化铀氟化。在俄罗斯这两种方法都采用。从经济角度说,后一种方法因需要昂贵的氟气较少(比前一种方法少2/3)而更具吸引力。无论采用哪种方法,所发生的都是放热反应,因而有

工业核燃料和包壳生产

工厂	生产类型		年生产能力(吨)	1992年产量(吨)
	反应堆	最终产品		
埃列克特罗斯塔尔 (莫斯科附近)	WWER-440型	燃料组件	700	230
	RBMK	燃料组件	570	570
	BN	堆芯燃料	20	
	BN	反应堆增殖区燃料	15	
新西伯利亚	WWER-1000型	燃料组件	1000	210
奥斯特-卡缅诺戈尔斯克 (哈萨克斯坦)	WWER	燃料芯块	2650	220
	RBMK			570
格拉佐夫	WWER	锆合金	2000	
	RBMK	管材	6000千米/年(管材)	2000千米/年(管材)

大量的热释出,使反应器中达到极高温度。因此,在为这些过程设计设备时,必须特别注意热量的导出和反应器所用材料的选择。

● **燃料元件制造设施。**燃料元件、燃料组件及燃料芯块的工业制造在3座工厂中进行:2座在俄罗斯(埃列克特罗斯塔尔和新西伯利亚),1座在哈萨克斯坦(奥斯特-卡缅诺戈尔斯克)。埃列克特罗斯塔尔厂主要生产 WWER-440、BN-350 和 BN-600 型反应堆用燃料元件、燃料组件和芯块。它还生产 RBMK-1000 和 RBMK-1500 型反应堆用燃料元件和燃料组件,这两种堆所用的燃料芯块由奥斯特-卡缅诺戈尔斯克厂提供。新西伯利亚厂制造 WWER-1000 型堆用燃料元件和燃料组件。WWER-1000型堆用燃料芯块则由奥斯特-卡缅诺戈尔斯克厂提供。锆生产和锆基合金材料的部件制造在格拉佐夫(俄罗斯联邦的乌德穆尔特)进行。

为将六氟化铀转换成二氧化铀,采用两种方法。埃列克特罗斯塔尔厂使用火焰喷雾工艺。此系一种气态法或“干”法。利用此工艺所得的二氧化铀粉末的自由流动性不够大,因此需进一步处理,以产生所谓可压粉末,即一种可挤压成芯块的粉末。

俄罗斯大部分燃料芯块是在哈萨克斯坦的奥斯特-卡缅诺戈尔斯克厂生产的。该厂采用 ADU 工艺,将六氟化铀加工成二氧化铀。此工艺涉及六氟化铀的水解、多铀

工厂/设施	反应堆	年生产能力	1992年产量
马亚克的“Paket”	BN-350	10-12 FA	4 FA
车里雅宾斯克	BN-600	300 千克 MOX	100 千克 MOX 燃料(约 20% 钷)
“Paket”(改进型), 自 1993 年以来	BN-600	40 FA 1 吨 MOX 燃料	
RIAR 设施 (季米特洛夫格勒)	BOR-60 BN-600	1 吨 MOX 燃料 (振实)	600 千克 MOX 燃料
车里雅宾斯克联合企业工厂	BN-600 BN-800	60 吨 HM	
(完成 50%-60%)	(WWER-1000 型)		
克拉斯诺雅尔斯克厂	WWER-1000 型	未定	

注:FA=燃料组件, HM=重金属

酸铵的沉淀、烘干、煅烧和还原成二氧化铀诸步骤。RT-1 厂生产的熔饼用作制造 RBMK 型堆燃料元件的燃料芯块的原料。

混合氧化物(MOX)燃料的制造

乏核燃料的管理

尽管闭式燃料循环有积极的一面,也就是使从乏燃料中回收的铀和钷的重新利用成为可能;但也有消极的一面,即会产生大量高放废物(HLW)。有些核素的半衰期长达数千年。在此整个时期内,必须将它们加以可靠地的封隔,防其进入人类环境。

可靠地处置放射性废物的一个决定性因素,是选择有足够化学稳定性的基质材料,以包容固化废物。这类材料包括磷酸盐玻璃和硼硅酸盐玻璃及一些类似矿物的材料。这些材料的优点是它们有很强的束缚

设 施	反应堆	生产能力	产 品
车里雅宾斯克马亚克联合企业的 RT-1 后处理厂(自 1971 年以来)	WWER-440 型快堆和船用堆	400 吨重金属/年 (HM/a)	后处理的铀重新用于 RBMK 型堆的燃料生产,钷以氧化物形式贮存
克拉斯诺雅尔斯克 RT-2 后处理厂	WWER-1000 型	第一条生产线: 1500 tHM/a 第二条生产线: 1500 tHM/a 共计:3000 tHM/a	后处理的燃料将重新用于 WWER 型和 BN 堆的燃料生产
各 RBMK 核电厂场址的贮存设施	RBMK 型	2000 tHM	
RT-2 厂的贮存设施	WWER-1000 型	6000 tHM(目前的贮存能力 3000 tHM)	

俄罗斯的乏燃料后处理和管理

注:RT-2 后处理厂在建造中。竣工日期待定。

所含元素的能力,使其不易被浸出。

俄罗斯选择了玻璃固化处理。第一座 HLW 玻璃固化中间规模设施于 1987 年在 RT-1 厂投入运行。玻璃固化过程在一个陶瓷反应器内进行。水冷钼棒作为电极恰当地放置在该容器内。在 1988 年陶瓷炉停止运行前,该设施共处理约 1000 米³ 实际的 HLW,产生 160 吨约含 400 万居的玻璃块。

1991 年,RT-1 厂有一台新的电炉投入运行,其处理能力为 500 升溶液/小时。在研制此炉时考虑了第一台电炉的一些缺点。迄今,新电炉已处理约 5000 米³ 液态 HLW,产生近 900 吨磷酸盐玻璃块,所含放射性核素的活度约为 1.35 亿居。

如果能找到事先根据放射性核素的半衰期、毒性和可能的用途将其分类的方法,那么与后处理和放射性废物的可靠处置相关的问题就会大为减少。现正为实现此目标进行大量工作。

除核燃料循环设施产生的 HLW 外,还有大量低放液态废物产生。核电厂和放射化学设施的放射性废水,用过滤、蒸发、离子交换和其他方法予以净化。溶液被净化到可重新使用的程度。在此过程中形成的浓缩物和中放液态废物,将被贮放在专用罐内或被固化。有些核电厂已经拥有用沥青固化法固化液态废物的设施。

到 2000 年,俄罗斯的所有运行中的核电厂和所有计划退役的核电厂都必须建成用于固化和贮存液态废物的设施。

铀在核燃料中的利用

俄罗斯于 50 年代末开始进行有关将铀用作核燃料的研究工作。1957 年,为 IBR-30 脉冲堆制造过一个由金属燃料(铀合金)构成的堆芯。1959 年,BR-5 钠冷快堆在奥伯宁斯克的动力物理研究所投入运行。它使用二氧化铀燃料,堆芯装料总量约为 150 公斤。1965 年同样类型的燃料用于 IBR-2 脉冲堆堆芯,其总装料量在 120 公斤左右。这 2 座脉冲堆仍在杜布纳核联合

研究所运行。

这些活动并非是一项大规模计划的一部分,而是个别委托的项目。对铀燃料的系统研究始于 1970 年。在季米特洛夫格勒核反应堆科学研究所的 BOR-60 和 SM-2 反应堆上进行了有关试验。在此项研究的第一阶段,氧化铀和氧化铀的机械混合是用来生产这种燃料的主要工艺。相当多的燃料元件都是用此法生产的。为了评价对这些燃料元件的性能有影响的众多因素,在反应堆上进行了试验。有些燃料组件燃料耗率高达 20%,而不影响燃料元件的完整性。

在 BOR-60 反应堆上取得了有关混合氧化物(MOX)燃料的可靠而稳定的试验结果后,在工业规模的 BN-350(哈萨克斯坦)和 BN-600 堆上进行了更广泛的试验。

BN-350 和 BN-600 型堆的燃料循环最初是为使用对增殖堆来说当然是不理想的氧化铀燃料而设计的。由于这些堆的设计和物理特性,将其全部转成使用 MOX 燃料是不可能的。但是,这些反应堆可用来对多达 25-30 个含氧化铀和氧化铀燃料的燃料组件进行试验。

为此,在车里雅宾斯克的马亚克联合企业建造了一个名为“Paket”的,能为这些反应堆每年生产 10 个燃料组件的中间规模设施。所用的结构材料同用于铀燃料的一样(即燃料元件包壳用奥氏体钢,六边形外套管用贝氏体钢)。在 BN-350 和 BN-600 型堆中,重原子的燃料耗率达到 9%-11%。而任何燃料元件都未失去其完整性。对从反应堆卸出的燃料元件进行的试验表明,它们的使用寿命还没有到。

俄罗斯决定(在南乌拉尔和别洛雅斯克核电厂)建造旨在使用 MOX 燃料的 BN-800 堆,进一步推动了这类燃料的研究工作。在马亚克综合企业开始实施一项工程,设计并建造一座为这些堆和 BN-600 堆生产 MOX 燃料与燃料组件的工厂。特别强调工厂本身及周围地区的辐射安全问题。这意味着尽可能减少那些产生粉尘的作业。其中最重要的作业之一是氧化物的机械混

合。因此,开始开发能用来生产 MOX 燃料而较少产生粉尘的其它工艺。首先开发的工艺是溶胶—凝胶法。采用这种方法可以生产粒状的便于压制芯块的 MOX 燃料。利用这项技术生产了一些实验燃料组件,这些燃料组件已成功地在 BN-350 堆上进行了试验。

不过,用溶胶—凝胶法制取的颗粒制造燃料芯块还有不少困难,因而使制造的芯块不可能达到高而稳定的质量。因此,同时又开发了一种用表面活性剂的铀和钚的氨共沉淀的技术。用这一技术能生产形状不规则的,较少产生粉尘的颗粒,它们可很容易地制成符合标准的芯块。利用此技术为 BN-600 生产了 12 个燃料组件。其中多数在进行了寿命期试验后已从反应堆中卸出,其余组件仍在接受辐照。

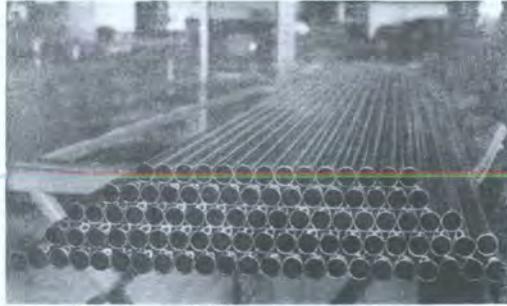
作为这种工艺的替代方法,现正开发铀和钚的碳酸盐共沉淀工艺。利用此法生产的燃料尚未在反应堆上进行试验。可用来生产 MOX 燃料的另一项工艺——铀钚硝酸溶液混合液的等离子体化学脱硝法——尚处于初期研究阶段。

上述所有 5 种工艺都有同一个目的:生产燃料元件的芯块。不过,俄罗斯还在进行大量研究工作,开发在利用各种技术生产的颗粒燃料基础上,用振动压实方法生产燃料元件的工艺。尤其是,季米特洛夫格勒的核反应堆科学研究所已开发出氧化铀和氧化钚共沉淀电化学技术。阴极沉淀物经处理并被还原成细粉末后,按颗粒大小被分成 6 份。然后将粉末装入燃料元件包壳内,放在振动机上将其压实。通过控制各份颗粒的比率,可使燃料元件达到很高的平均燃料密度。

到现在为止,装入 BOR-60 堆的所有燃料元件都是利用这种工艺生产的。此外,还在 BN-350 堆和 BN-600 堆上,分别试验了 2 个燃料组件和 6 个燃料组件。

计划和前景

在过去几十年内,为保证开发工业规



格拉佐夫厂核燃料元件的管材(来源:Minatom)

模的 MOX 燃料生产工艺进行了大量工作。一度中断的生产此种燃料的工厂的建造工作正在恢复中,以便为 BN-800 和 BN-600 堆提供铀—钚燃料元件。该厂估计已完成 50%—60%,再过几年即可竣工。

为此,近期计划改造“Paket”中间规模设施,将其生产能力提高到每年能为 BN-600 型堆提供 40 个燃料组件。核反应堆科学研究所将利用振动技术提供相同数量的燃料组件。这样一来,便可进一步研究 MOX 燃料元件使用中发生的各种问题。

同时必须承认,与其他拥有相当完善核动力计划的国家一样,俄罗斯现在还不能很快回用所有已经积累和正在积累的反应堆级钚库存。俄罗斯已经有约 30 吨这样的钚。此外,后处理能力约为 400 吨乏燃料/年的 RT-1 厂每年约产 2.5 吨钚。

由于核武器裁减,预料库存钚的数量会大大增加,因而这一情况将更加复杂。科学家们一致认为,只有扩大快堆应用才能实现全部钚的再循环,但看来这只是下一世纪的事。当前,利用轻水堆解决这个问题的希望极其有限。

在俄罗斯,关于在轻水堆中利用钚的工作还仅仅开始。正在对 WWER 型堆进行必要的物理计算。另一种正在考虑的可能性是——在那座正在车里雅宾斯克建造快堆燃料工厂——建造一座生产 WWER-1000 型堆用燃料元件和燃料组件的中间规模设施。在较远的将来,俄罗斯计划在克拉斯诺雅尔斯克——在目前建造中的大型 RT-2 乏燃料后处理厂旁边——建造一座专用厂,生产 WWER 型堆用 MOX 燃料。□