

动力堆和研究堆的乏燃料管理： 国际现状和趋势

大多数国家暂缓决定最终处置和后处理方案，贮存设施正在扩大

F. Takáts、
A. Grigoriev 和
I. G. Ritchie

乏燃料管理通常是核燃料循环中最重要的阶段之一，也是所有拥有核反应堆国家所共有的最重要的问题之一。

乏燃料管理从卸出动力堆和研究堆中的乏燃料开始，以乏燃料的最后处理(或直接处置或进行后处理)结束。目前有两种燃料循环方案——一种是开式即一次通过式燃料循环，对乏燃料进行直接处置；另一种是闭式燃料循环，对乏燃料进行后处理，并把提取的铀、钍制成新的混合氧化物燃料进行回用。

直接处置，就是将乏燃料存放在一个不可回取的地方。后处理就是从乏燃料中分离出易裂变的铀和钍，以作新燃料复用。乏燃料战略的选择，是一个复杂的过程，必须考虑许多因素。它们涉及到政治、经济和安全保障问题，以及环境保护问题。由于现时的铀价格低廉，回用的铀和钍的成本均高于新开采的铀的成本。

一些国家推迟实施乏燃料后处理方案，另一些国家则完全摒弃这种方案，以及几乎所有国家都推迟对乏燃料的最终处置，这已导致乏燃料中间贮存的时间越来越长。这种“等着瞧”的方针为评价可采用的选择方案和选择最合适的技术，提供了更多的时间和可能性。因此，乏燃料管理问题对许多国家来说已显得越来越重要。

目前不同国家的乏燃料管理政策可分成如下三大类：

- 以乏燃料中间贮存为主，然后进行最终处置的一次通过式燃料循环；

- 对运行中或建造中核电厂的乏燃料取后处理的方案，或与外国签订合同将乏燃料送往国外去后处理，然后将部分或全部回收燃料返回；

- “等着瞧”方针，采取这种方针的国家仍在对一些乏燃料管理计划进行评价。

贮存中的乏燃料

核电厂。1992年，核电厂各种类型反应堆产生的乏燃料量约达 10 000 吨重金属(tHM)，估计至今乏燃料累积总量超过 135 000 tHM。其中约 90 000 tHM 乏燃料被贮存着。

乏燃料的累积量是目前全部年后处理能力的 20 多倍。到 2000 年，全世界每年产生的乏燃料量预计从 1992 年的 10 000 tHM 增加到超过 11 000 tHM。

到 2000 年，预计累积产生的乏燃料量达到 225 000 tHM。(见图。)假定对其中的一部分进行后处理，估计贮存的乏燃料量约为 15 000 tHM。由于首批大规模乏燃料最终处置库要在 2010 年以后才有可能投入运行，所以“中间”贮存将是今后 20 年的主要选择方案。

研究堆。对研究堆而言，IAEA 目前没有一个有关乏燃料贮存量的综合数据库。为了改变这种状况，最近向研究堆和试验堆的营运者送发了调查表，现正在对至今已收到的答复进行评价。美国已出口了

Takáts、Grigoriev 和 Ritchie 先生是 IAEA 核燃料循环和核废物管理处的工作人员。

25 000 公斤以上高浓铀 (HEU)。其中约 17 500 公斤目前正在 51 个国家中使用或以乏燃料贮存。美国出口的大部分 HEU 到了 12 个欧洲原子能共同体国家 (占 85%)，其余到了其他 39 个国家。

许多研究堆营运者发现他们自己因乏燃料管理问题而处于危机状态。这在某些西欧国家里尤其是这样，这些国家研究堆运行许可证的展期受到乏燃料问题是否能顺利解决的制约。这种危机是由于浓缩铀供应国 (主要是美国和俄罗斯) 停止收回研究堆乏燃料的做法而引起的。这种危机由于实施“研究堆和试验堆用燃料浓缩度降低计划”而加剧。该计划已使研究堆旁的许多贮存池充入了 HEU，并使低浓缩度燃料的周转量加大。尽管有些令人鼓舞的迹象，即美国和俄罗斯将恢复其收回研究堆乏燃料的做法，但任何长时期推迟实施这些政策，都可能导致重要研究设施的关闭。

乏燃料贮存设施。乏燃料贮存包括在对乏燃料进行后处理或最终处置前与燃料贮存有关的全部活动。乏燃料贮存设施可以位于反应堆处 (AR)，也可以“离堆” (AFR) 位于核电站外部，后者可能用作若干座反应堆的乏燃料中心贮存设施。乏燃料贮存设施还可以按贮存所用冷却介质分成“湿法”或“干法”两种。“湿法”贮存设施就是把乏燃料贮存在水池内。乏燃料可以通过格架固定在水池内，和/或存放在浸于水中的金属容器内。“干法”贮存设施就是把乏燃料贮存在气体环境中，例如惰性气体或空气。干法贮存包括在容器内或贮存室内贮存乏燃料。这种容器非常之大，它可以设计成容易搬运，或不易搬运。贮存室由一些地面上或地面下的钢筋混凝土建筑物构成，这些建筑物包含有一排排适合于存放一个或几个燃料组件的贮存小室。

对乏燃料中间贮存的需求取决于与所选择的管理方案有关的许多条件。在闭式燃料循环方案中，可能需要更大的贮存能力，以便使产生的乏燃料与可利用的后处理厂后处理能力相适应。对一次通过式燃料循环来说，乏燃料需要贮存到最终处置

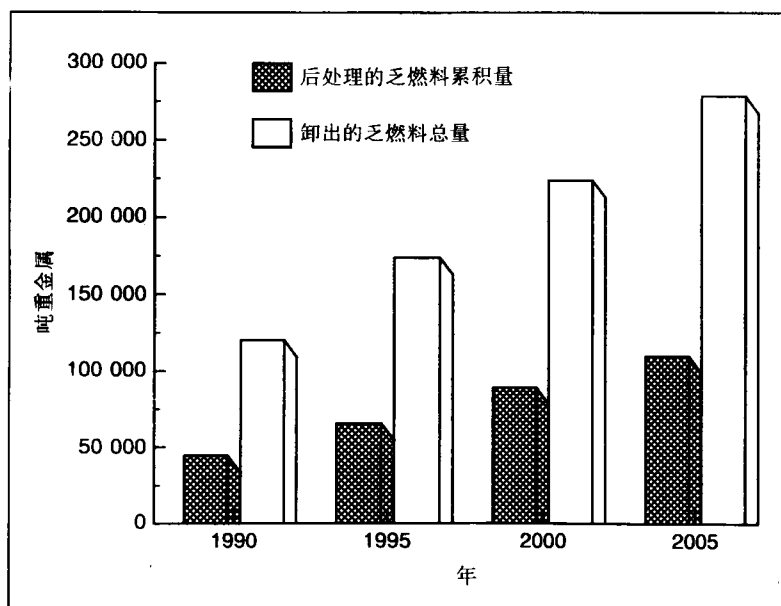
库建成并投入使用为止。显然，对于暂缓作出建库决定，要有充分的中间贮存能力也是一个关键因素。

各种类型的湿法和干法贮存设施正在运行中，或正为某些国家所考虑。所谓 BEFAST 的 IAEA 的协调研究计划 (CRP) 已经证明，乏燃料是可以安全贮存相当长时间的——有些乏燃料至今已贮存了 30 多年。拥有运行中核电厂的几乎所有国家，通过再把现在用的中子吸收材料放在乏燃料组件之间的格架上，或通过燃料棒密集化或将其仅仅更合理地分布在贮存池内，已提高了他们现有的 AR 贮存能力。

这些改进已使他们的贮存能力至少提高了 2 倍。贮存能力的进一步提高也许需要求助于辐照过燃料临界性计算方面的所谓“燃耗可信度”。

在许多情况下，光作这些改进是不够的，必须建造一些分散的 AFR 贮存设施。虽然大多数贮存设施是湿式的 (例如法国、英国、俄罗斯和瑞典的贮存设施)，但是有大量乏燃料的许多国家已选择或正在选择 AFR 干法贮存 (例如加拿大、德国、苏格兰和美国，此外，俄罗斯也正在为 RBMK 燃料开发干法贮存)。干法贮存有许多好处，其中包括非能动冷却的可能性、极少或无需维护和无腐蚀性的环境等。

预计核电厂卸出的乏燃料累积量



	运行中	建造中	计划中	关闭/备用
阿根廷	365			
比利时				370
保加利亚	600			
加拿大	475	200	12 600	
中国			500	
捷克共和国			600	
芬兰	1 270			
法国	15 000			
德国	2 150		700	1 500
匈牙利			600	
印度	523			
日本	140		3 000	
大韩民国			3 000	
俄罗斯	10 100	1 900	3 000	
斯洛伐克共和国	600			
西班牙			5 500	
瑞典	3 000	2 000	4 000	
联合王国	10 350		1 200	
乌克兰	1 900			
美国	900		15 000	
总计	47 373	4 100	49 700	1 870

注:表中值以吨重金属计。美国的许多反应堆已获准再建一些干法贮存设施。

来源:向 IAEA 报告的数据。

截至 1992 年底的高堆贮存能力

1992 年,运营中的 AFR 贮存能力为 47373 tHM,其中湿法贮存量为 44833 tHM,干法贮存量为 2540 tHM。(见表。)这些数字也包括了后处理设施的贮存池能力。

鉴于公认 AFR 技术已经成熟,预计其基本原理近期不会有什么变化。尽管如此,仍有一些可能会影响未来 AFR 设计的因素,具体如下:

- 一些处置概念的影响(当决定处置时)。在最大限度地减少处理工作量的切实可行的初期阶段,为了将乏燃料放入适合于处置要求的容器内,可能会有些压力。

- 贮存较深燃耗燃料和/或一些新型燃料的新要求。

- 电力公司针对临界性条件提出燃耗可信度要求的希望。

- 电力公司关于延长贮存时间的希望。这一愿望将会影响对 AFR 设施的检查和维护,并更多地要把重点放在燃料降质机理上。

东欧各国的政策和贸易关系方面的变化,正在影响他们的乏燃料管理政策。俄罗

斯现在要求按“世界价格”水平用硬通货支付服务费。对于出自俄罗斯的燃料的运输及其后在俄罗斯的后处理,还存在一些法律问题。这样一些因素或许会导致这些国家的乏燃料管理政策的变化。

在尚未决定选择后处理还是直接处置方案的情况下,建造中间贮存设施可能是一种临时解决办法。例如,1992 年匈牙利决定在其波克什核电厂建造一个 AFR 贮存设施。由 IAEA 召集的一个独立的专家小组帮助波克什核电厂评价了各种技术。其营运者最后选择了干法贮存室式设施。这个设施计划于 1995 年春建成。捷克共和国的专家们决定在杜库凡尼厂址建一个干法容器贮存设施。其他苏联设计的压水堆(WWER)的营运者也正在对他们可以采用的方案进行调研,以延长乏燃料贮存时间。(东欧各国的乏燃料贮存量见表。)

全球需求和 IAEA 服务

在 1991 年简单介绍的 IAEA 中期计划中,乏燃料管理被认为是最优先的一项活动。为了改进现有的贮存设施使之达到令人满意的性能,特别是为了向正在考虑建造新的贮存设施的国家提出建议,机构一直在执行下列计划:

- 编纂一套相当于乏燃料贮存安全国际细则的安全文件。

- 有关乏燃料管理各方面的咨询计划。

关于乏燃料贮存安全丛书文件。目前正在编纂关于动力堆乏燃料安全贮存方面的三个文件。第一个文件是关于乏燃料贮存设施设计的安全导则,第二个文件是关于这些设施运行的安全导则,以及第三个文件是关于编写乏燃料贮存安全分析报告的安全实施文件。

这些文件是通过使该领域一些世界著名专家聚集在一起的一系列会议制订的。它们只有经机构的安全丛书审议委员会反复审议之后才能发表。按照目前的计划,这些文件将可以于 1994 年编纂好出版。估计

它们将有助于各成员国建立本国的标准。为起草有关研究堆和试验堆乏燃料贮存设施的设计、运行和发放许可证的安全导则，一些准备工作也已经开始。

辐照过的燃料管理咨询计划 (IFMAP)。如前所述，研究堆和商用堆辐照过的燃料的贮存时间和贮存量分别比原设计的要长和要多。虽然少数工业化国家已经开发了一些提高现有贮存能力，或按照现代化标准新建贮存设施的方法，但这种资料别的国家往往是不容易得到的。

鉴于燃料类型多种多样，尤其是研究堆的燃料，人们在就可能的长期解决办法作出重大决策以前，可以从对辐照过燃料管理的技术概念、运行经验、安全性和管理等方面的公正评价中得到一些好处。这种信息资料对持续运行研究堆 40 年以上的国家也是十分重要的。

为了实现这些要求，IAEA 已开始实施 IFMAP。IFMAP 将为需要其服务的成员国（尤其是发展中国家）就辐照过的燃料贮存的具体方面和制定国家计划方面提供咨询。

1990 年，一专家小组访问了中国，就其核电厂产生的乏燃料的贮存提出了建议。如前所述，1992 年 IAEA 小组帮助匈牙利作了乏燃料中间贮存方案选择。1992 年，IAEA 为帮助乌克兰和泰国制定乏燃料贮存计划，还同这些国家的专家举行了初步讨论。

其他有关活动。如前所述，IAEA 正在执行简称为 BEFAST 的协调研究计划。其重点主要是研究长期贮存期间的乏燃料和贮存设施部件的行为。该计划于 1981 年开始执行，它的两个阶段业已完成，其结果已由 IAEA 发表。该计划的第三阶段于 1992 年开始。它包括与 12 个国家的参加单位签订的 15 项研究协定或合同。这些国家的乏燃料贮存经验将用来帮助建立一个有关这方面的国际数据库。预计其成果对有些国家，尤其是发展中国家将是有益的，因为它们将对有关乏燃料长期贮存的安全性提供一个极好的记录。有关数据对那些设

东欧各国动力堆乏燃料的贮存量

	在堆贮存 (AR)	离堆贮存 (AFR)	总 数
亚美尼亚	30		30
保加利亚	320	120	440
捷克共和国	170	140	310
匈牙利	300		300
立陶宛	800		800
俄罗斯	3900	4950	8850
斯洛伐克共和国	140	440	580
乌克兰	830	1430	2260

* 其中包括计划运回捷克共和国的 140 吨。

注：表中数值以吨重金属计。来源：向 IAEA 报告的数据。

部分国家的乏燃料管理方案

	暂缓决定	直接处置	后处理
阿根廷	●		●
比利时			●
巴西			●
保加利亚	●		●
加拿大		●	
中国			●
捷克共和国	●		●
芬兰	●	●	●
法国			●
德国		●	●
匈牙利	●		●
印度	●		●
意大利	●		●
日本			●
大韩民国	●		
立陶宛	●		
墨西哥	●		
荷兰			●
巴基斯坦	●		
俄罗斯			●
斯洛伐克共和国	●		●
斯洛文尼亚	●		
南非	●		
西班牙	●		●
瑞典		●	
瑞士			●
联合王国	●		●
乌克兰	●		●
美国		●	

注：一些国家对不同类型的燃料有不同的乏燃料管理方法。目前，有些国家只采用一种乏燃料管理方法，但正在对将来使用不同方法的管理方案进行评价。来源：向 IAEA 报告的数据。

计或审批中间贮存设施的国家将特别有价值。

最近,IAEA 还开始实施一项研究乏燃料贮存设施所用材料可能降质的 CRP。此专题之所以重要,是由于中间贮存设施的

正常运行时间越来越长。人们对许多结构材料的长期老化特性了解甚微,尤其是在辐照引起或促进降质机理的情况下。

为了帮助发展中国家的专家提高运行他们自己的贮存设施的能力,机构还在组织跨地区和地区培训班。1993 年将举办几期 2—3 周的培训班,并计划在今后几年继续举办几期。机构将分别为核电厂和研究堆的操作人员举办培训班。

今后的方向

在未来 10 年内,预料乏燃料长期贮存将是全世界核营运者遵循的最普遍的选择方案。至今,没有发现严重的安全问题。然而,这方面的经验还不足 40 年,而对贮存要求的时间可能是在 80 年以上。

对有些领域也许需要给予更多的关注。这些领域包括与深燃耗燃料的安全贮存有关的问题;损坏或破损燃料的贮存;长期贮存的经济性;不同的和新的贮存技术的利用;以及使用中的现有技术的改进。在这些领域和其他一些领域,IAEA 仍将一如既往地帮助一些国家回答一些问题并找到问题的解决办法。 □



加拿大混凝土罐乏燃料贮存设施俯视图(来源:AECL)



联合王国塞拉菲尔德热氧化物后处理厂乏燃料贮存池(来源:BNFL)