卡尔斯鲁厄核研究中心（联邦德国）乏燃料屏蔽容器。（来源：KFZ）

# 乏燃料的长期贮存和处置

Alexander Nechaev, Vladimir Onufriev
和 K. T. Thomas

众所周知，乏燃料和玻璃固化的高放废物(HLW)，都是高放射性和衰变热的来源。因此，乏燃料组件在进一步处理或处置前，应当贮存在冷却介质中。衰变热随时间迅速减少，感生放射性则下降较慢，大多数乏燃料的裂变产物将在300至1000年后衰变到可接受水平。*

钚、镅、碘、锝的主要同位素和铀的主要衰变产物，在几百万年以后仍然有放射性。从放射毒性的观点看，在约10000年的时间里，都要给予它们最大的关注。虽然公共机构对人工地表结构的控制不可能持续这么久，但地质方法可以做到这点。正是出于这种考虑，乏燃料的地质处置才能成为一种有吸引力的方案。

对于核燃料循环后段的任何战略选择，都认定乏燃料长期贮存是整个废物系统中的一个非常重要的部分。在长期贮存设施，不但将进行乏燃料组件的搬运操作，而且还将进行包装操作，甚至是燃料棒密排操作。还存在这样一种可能性，即将长期贮存后和未经再包装的乏燃料处置在金属容器中。*

## 当前的贮存问题

就核燃料循环的后段来说，现在正在考虑仅有的两种比较明确的方案：或早或晚进行后处理和直接处置（乏燃料或放射性废物）。不论采用哪种方案，乏燃料的短期或长期贮存，都是必要的。（见第17页方案一览图。）

原子能机构和经济合作与发展组织的核能机构(OECD/NEA)进行的研究表明，到2000年，世界各地水冷反应堆将积存约200000吨重金属（铀）。其中将被后处理的不会超过四分之一。**

---

Nechaev 先生是核材料和燃料循环技术科科长，Onufriev 先生是该科工作人员，Thomas 先生是核燃料循环处工作人员。

* 更详细的技术资料见：

*Guidebook on Spent Fuel Storage*, IAEA Technical Reports Series No. 240, Vienna (1984); "Characterization of Long-lived Radioactive Wastes to be Disposed in Geological Formations", by M. Boeola, Working Document SCK, CEN, Mol, Belgium (1983).

* 参看 *"Nuclear Fuel"* (28 January 1985) 报道的美国能源部关于有监测可收回贮存设施在废物管理系统中未来作用的建议。

** 见"Final Report of the Expert Group on International Spent-Fuel Management", IAEA Reg. ISFM/EG/26 (1982), *Summary of Nuclear Power and Fuel Cycle Data*, OECD (1985).

尽管全世界现有的、将交付使用的和已规划的设施(反应堆场地贮存设施和远离反应堆场地贮存设施)贮存能力大于未经后处理燃料的年产生量，但在90年代某些电力公司将经历一段贮存能力不足的时期。*

这个贮存问题之所以产生，是由于现有核电厂是这样设计的，即乏燃料在反应堆厂址要贮存3至5年，以便使卸出的燃料在运往后处理设施之前得到冷却。鉴于快中子增殖反应堆(FBR)的商业建设推迟，后处理价格高和铀的供过于求，现在各国都在寻求增加贮存能力的最好方法。

## 贮存问题的一些可能解决办法

可用来解决这个问题或推迟其解决的方案有：

·运出乏燃料，也就是把乏燃料从反应堆厂址贮存池，运到电力公司系统内别处一个有剩余空间的贮存池。在美国，这可以减少（约43%）1998年以前所需的累积附加能力。**然而，这可能需要增加运输容器投资，还会带来一些管理和许可证审批方面的困难。这一方案只能推迟最后决定的时间。估计费用为10至40美元每千克铀，这取决于运输距离。***

·用密集贮存架，双层排列和棒的密排方法扩大反应堆场地现有贮存池的能力。重新装架和双层排列都是经过验证的技术，而棒的密排则需要进一步研究和发展，才能成为一种完全许可的实施方法。估计重新装架或棒的密排的费用约10美元每千克铀****。本方案也能推迟关于长期贮存问题的最终决定时间。

·建造新的离堆贮存设施，以便集中贮存乏燃料50年或更长时间，到那时将可运用直接处置或后处理方案。可以设想，在反应堆厂址贮存池装满后和在运往后处理或直接处置库址前，本方案是贮存乏燃料的唯一可能方案。然而，这种设施的建造既费时(不少于10年)又昂贵。

## 长期贮存的经验

乏燃料长期贮存有两种方案：

·湿法贮存，这是长期贮存氧化物燃料的一种经过验证的工艺，锆合金和不锈钢的包壳及水堆燃料已在水池中成功地贮存了20年以上，没有发生值得注意的腐蚀和裂变气体释放。预计把贮存时间延长至50年，也不会引起严重的问题。

·干法贮存，指在空气、惰性气体或二氧化碳气氛中贮存乏燃料。这是一种正在成为得到验证的工艺。虽然干法贮存乏燃料的验证确实是有限的，但德意志联邦共和国的安全计算表明，在惰性气氛中，乏燃料能够安全地贮存40至50年。加拿大和美国提出的一种在未加限制的空气气氛中贮存乏燃料的方案也表明，贮存时间至少可望达到40至50年。（然而，在将燃料棒为贮存而插入时，其包壳的最高温度应当限制到175℃。据计算，在惰性气体气氛中贮存的锆合金包壳，允许的插入温度为400℃左右*。这意味着对未加限制的空气气氛中的贮存来说，乏燃料首先应当贮存在水池中或惰性气体气氛中，以便燃料棒包壳的温度降至所需的水平。）

湿法与干法贮存设施的主要差别在于后者具有模块式特征，当需要时能够逐步扩大贮存能力。

目前许多成员国，包括加拿大、芬兰、意大利、瑞典、联合王国、美国和苏联，正在进行贮存设施的设计、建造和许可证审批方面的研究和发展工作。用于乏燃料长期贮存的集中贮存设施，在瑞典和德意志联邦共和国都已投入使用。某些国家已宣布了开始建造这种设施的规划，汇总情况见附表。

要对各种长期贮存方案——湿法方面的水池和干法方面的金属容器、混凝土密封容器、地下室和干井——进行费用比较是相当困难的，因为影响因素是因国家不同而有变化的。对于为期40年的乏燃料贮存来说，估计水池设施的费用为45至220美元；干法贮存设施和费用为33至83美元（1984年美元每公斤铀）。**

从第一批设施的设计、许可证审批和建造经验看来，已考虑的因素包括：累积的乏燃料数量及其动态；气候和地震条件；各种工业能力的可利用性；公众的承认；和安全报告所需的数据的可利用性。

---

* 这种情况在1982年原子能机构专家组的"国际乏燃料管理"研究中就显示出来了，随后由D.R. McLean, F.N. McDonnell等人的一篇题为"加拿大乏燃料管理的现状"的论文所确认，该文曾在1984年3月召开的原子能机构顾问组乏燃料管理会议上提出。

** 见 "Utilities face squeeze in spent nuclear fuel storage space", by E. Anderson, *Chemical and Engineering News, (1April 1985).*

*** 见 "Choosing a spent-fuel storage technology", by E. R. Johnson, *Nuclear Engineering International* (September 1984).

**** 见 *Status of Spent-Fuel Dry Storage Concepts: Concerns, Issues, and Developments*, TECDOC-359 (1985).

* 见 "Experience in the Safety Evaluation of Dry Spent-Fuel Storage Casks in the Federal Republic of Germany", by B. Droste; "Interim Dry Spent Fuel Storage-Experience from Safety Analyses in the Atomic Licensing Procedures", by A. Müller; and "Heat Removal from Dry Stored Spent-Fuel Elements", by M. Neumann, papers presented at the IAEA Technical Committee Meeting on Methods Used in the Design of Wet and Dry Spent-Fuel Storage Facilities, Espoo, Finland, 30 September to 3 October 1985（即将发表）

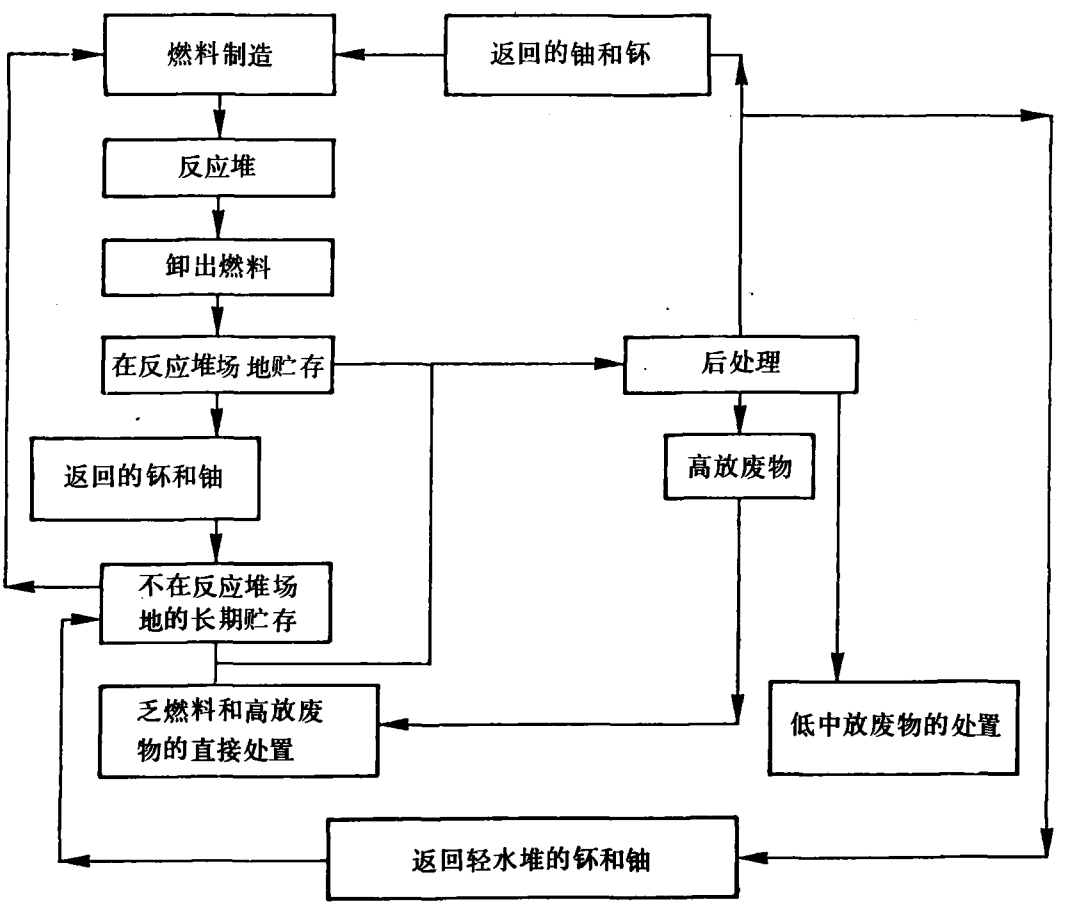
** "Storage of Spent Fuel: Experience and Trends", by A. Nechaev and V. Onufriev, paper presented at the 6th CMEA Symposium" Investigations in the Field of Spent Fuel Reprocessing and Radioactive Waste Decontamination", Pestany, Czechoslovakia (March 1985).

**乏燃料的AFR设施：贮存40年或更长时间**

| 国家 | 设施 | 类型 | 能力* | 状况 |
|---|---|---|---|---|
| 德意志联邦共和国 | 戈尔勒本<br>阿豪斯 | 在屏蔽容器（铸造型）中干法贮存 | 1500（420个屏蔽容器或更多） | 戈尔勒本：1983年9月得到使用许可证<br>阿豪斯：处于建设阶段 |
| 瑞典 | CLAB<br>集中贮存设施 | 地下洞穴中的水池 | 3000，在4个水池中（可以增加） | 1985年7月11日投入使用（接受6.5吨铀） |
| 芬兰 | TVO-KPA-STORE | 地下水池 | 600，在3个水池中（将增至1270） | 处于建设阶段（将于1987-88年投入使用） |
| 美国 | 有监测可回收贮存 | 在屏蔽容器或干井中的密闭金属容器内干法贮存 | 15 000 | 确定库址（将于1996年投入使用） |

* 吨铀（MtU）

核燃料循环后段方案的流程图



乏燃料处置的一种方案。井筒深度为1000米，直径为7米。（来源：美国能源部）

## 地质处置方案

在选择适合地质处置的介质时，要研究地质建造的水文地质学，地球化学，矿物学和热力学性质，构造强度和稳定性。只要地质处置库设计和建造得当，则许多地质环境中的多种地质介质都可考虑选为库址。

有可能作为放射性废物处置库库址的地质建造，可分为下列三组：蒸发岩（例如盐），沉积岩矿床，火成的和变质的结晶岩。

·岩盐（石盐） 这种很普通的蒸发岩已引起最大的注意。它具有许多有利的性质，并且作为地质建造中未受干扰的单元而广泛存在，表明它在若干亿年期间都是稳定的。它以层状沉积建造而存在，或由于挤压而向上隆起成一个大盐穹。它的高度可塑性使液体和气体都很难渗透。其它有利的性质是：良好的压缩强度，良好的导热性和易采掘性。可能的缺点有：存在一些能捕集卤水的矿囊；和存在一些已知其流体在一定条件下会迁移的包体；可能发生一些有害的金属容器-岩石相互作用；吸着性能差；盐可能迁移(盐丘)；将来可能在放置废物附近勘探盐和有关的资源；盐很容易溶于水。

·硬石膏（硫酸钙） 目前正在评价的只是位于中等深度的厚层的或块状的硬石膏。

·泥质建造 这些建造通常具有很低的渗透性，良好的吸着特性和低的溶解度。可能的缺点包括：含水粘土矿物在热负荷下会脱水；低的导热性和对岩石力学性质的有害影响；存在有机物和气体；存在不均匀性；和可能存在一些井下开采和保存掘进平巷的困难。

·火成岩和变质岩 这些岩石被一些国家看成是放射性废物深层地下处置库的主要候选者。它们通常表现出长期稳定性，高的岩石强度，良好的化学稳定性，相当良好的导热性和低的孔隙度。在某些国家，它们还具有另一优点，即一般存在很少有或没有经济价值的块状和均质建造。在处置库考虑的深度范围，这些岩石比较脆，无塑性，因而很可能存在一些裂缝和其它次生空隙。由于存在这些裂缝，在它们的次生空隙内通常含有地下水。岩石具有一些不均匀性——这主要是由于裂缝的性质、方向性和大小引起的——使水文地质学模拟发生困难。

其它具有特殊意义的火成岩是玄武岩和火山凝灰岩。玄武岩主要以大型高原状块体出现，是大陆上堆积的比较年轻的火成岩。玄武岩具有适中的导热性和很高的熔化温度；它还具有很高的压缩强度，但通常有断裂的或垂直的柱状节理。块状玄武岩的渗透性是很小的，但有断裂和节理的玄武岩，其渗透性是很大的，能够传输可观数量的地下水。玄武岩具有低的离子交换能力，但是，如存在次生的吸着性能较好的矿物，则这一性质将部分改变。

目前正在研究两种凝灰岩：熔结凝灰岩和沸石凝灰岩。许多凝灰岩矿床都含有蚀变矿物，例如具有很好吸着性能的粘土和沸石，这两种矿物都在脉岩内，沿原生或次生裂隙分布。凝灰岩由于一般具有高的孔隙度，通常含有大量水。

## 长期安全性的评价

在选择地质处置库时，必须考虑可能的热机效应；对流体释出和流量的影响；对缓冲材料和回填材料的影响；地球化学效应；和热负载。

乏燃料较长时间的中间贮存有好处，因为，它有利于降低处置库的温度。温度升高会影响岩石的力学性质。必须评价这些变化的长期影响，特别是那些处于很高自然应力状态的岩石。力学效应与矿物组成和

水含量的变化有关，这是在研究粘土和页岩建造时要考虑的课题。必须了解它们对不同类型的建造的影响，因为温度的升高会使原来的结合水释出，从而改变处置库附近的流动状况。在选择缓冲材料和回填材料时，必须详细研究它们在高温下可能产生的各种问题。

由放射性核素衰变放出的辐射可能产生许多效应，这些效应的相对重要性在很大程度上取决于废物处置特定方案的具体细节。例如，很耐久的厚金属容器会吸收几乎所有的辐射。对于这样的容器，就可以不考虑容器处的$\gamma$辐射效应。另一方面，薄容器外面的$\gamma$场可能是明显的，需要评价其影响。应当注意，处置前的中间贮存，会大大降低$\gamma$场和释热率。

由于放射性核素与地下水在物理-化学性质上的差异，因而会阻滞放射性核素的迁移，这种阻滞在某种程度上取决于主岩介质。这里涉及的主要物理-化学过程是化学溶解、扩散、离子交换、吸着、化学置换反应和超过滤作用。它们取决于溶液中各种化学物质的分布和性质。最重要的物理-化学参数是pH值、氧化还原电位、溶液的温度和其它各种天然产状物质的浓度。必须评价硫酸根、氯化物、铁腐蚀产物和络合剂在地下水中的含量。

在丹麦制造乏燃料贮存架。（来源：RDM）

## 库址考虑

只能在地质、水文和地球化学性质适宜的充分大的岩石建造上，建设最终处置库。虽然在技术上能够达到直至1000米的深度，但是在400至500米的深度建设一个处置库，通常已可满足安全方面的要求。根据现有的知识，可以设计乏燃料的安全最终处置系统；在今后20至30年期间或需要时，可以建设这样一个系统。

现在已有一些可供选择的设计方案，它们分别考虑了不同热负载和施工的可能性。一些有坚实花岗岩、玄武岩和穿脉粘土建造的国家，都为在这些建造中挖掘处置库而作了概念设计。其研究不但包括工程方面，而且包括对包装（从材料和工程的角度）、对缓冲材料和阻挡层物质以及对特性和安全评价的详细研究。继续广泛的研究和发展会使各国能够得到更多可作为最终处置库设计基础的数据。

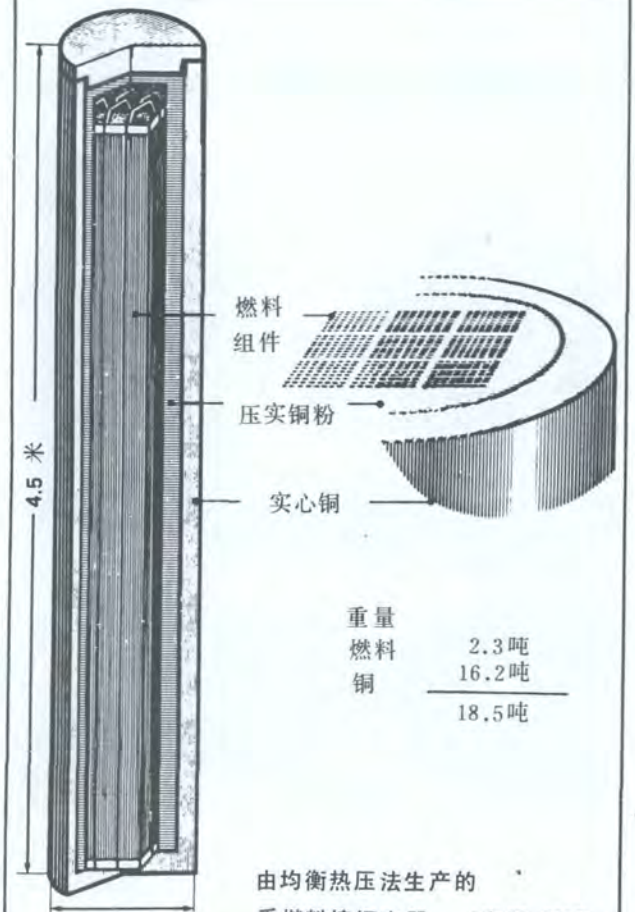
## 乏燃料的包装

乏燃料的包装必须看作是整个处置系统中的一个环节！它具有不同的功能，其功能取决于中间贮存的时间、运输和放置的考虑和封闭的持续时间。在技术上可用于乏燃料密封包装的方法是很多的。瑞典选择的一种方案，考虑使用熔融铅或热压铜粉填料，使燃料棒放入铜容器内的坚实基体中。容器放入空穴后，在其周围放入缓冲材料，例如非常密实的班脱岩粘土。然后用砂和班脱岩粘土的混合物填充所有的通道和井筒，使处置库被封闭。

处置库的回填和封闭对结构的安全要求来说是重要的。其功能在于填充安放空穴、通道和井筒；防止水的侵入或使水减至最少；提供岩石的支撑，使沉陷减至最小；为废物的包装提供化学和物理防护；有助于热量的消散；通过减少水的迁移而确保放射性核素的阻滞。可能的回填材料有：挖掘产生的废石、水泥、沥青、环氧基剂浆液和聚乙烯等。

在装有乏燃料的处置库的经营期以后，设想不再进行监视、库址监测或规定的管理控制。然而国家主管当局应考虑对库址区域设置标志，并提供实体性或其它管理控制。某些设计根据具体条件，考虑了回收处置材料的方案。

根据对库址的勘探和开发、处置库的建设、运行和退役的分析，从对设计特征和最优化的灵敏性的角度，研究了乏燃料处置的费用。这样的地下处置费用预计为现有发电成本的1至3%左右。在现有知识状态下，下一步将是建立中间规模验证设施，以提供用




由均衡热压法生产的乏燃料棒铜容器。（来源：SKB）

## 术 语 定 义

长期贮存和处置的区别何在？原子能机构把前者定义为“需要专门包装和（或）特殊装置的燃料单元长时期的贮存。这种燃料单元被后处理或被处置掉时贮存期结束”*。在贮存时，应该提供隔离、监测、环境保护和人为控制。接着的工作将是为最后处置或后处理而进行的处理和运输。

另一方面，乏燃料的处置被定义为“将燃料单元放置在足以达到环境保护要求的设施中，而不打算回收该燃料单元”（着重号是加的）。

对国家和国际的废物管理战略来说，这些定义都是重要的。现在许多成员国正在考虑将乏燃料的长期贮存期定为50年或更长。预计第一个最终处置示范设施，将在下一个世纪的早期建成。

* 见 *Spent-Fuel Storage Glossary*, TECDOC-354 (1985).

于工业发展的更逼真的数据和费用。

### 可讨论的课题

当然，乏燃料对人类可能构成潜在的危险，为了把它与人类环境隔离而采取有效的措施是必要的。这是今天最重要的最迫切的问题之一。

可是另一方面，乏燃料也是世界上一些数量有限的极其重要的元素的独特来源。例如，广泛用于化学、电学和医学领域的铑，其储量只有770吨左右，在地壳中的浓度是很低的。而乏燃料中铑的浓度却高得多，每吨乏燃料约有340克（地壳中每吨为 $1 \times 10^{-3}$ 克）。如果在2050年以前全世界能够卸出乏燃料600,000吨左右，那么在下一个世纪，乏燃料可能成为“新的人造”铑（以及钯和钌）储量的唯一来源。