

乏燃料贮存

的国际安全

保障概况

发展安全保障技术和方法，
迎接未来的挑战

V. Pushkarjov 和 E. Tkharev



乏燃料贮存是核燃料循环中一个重要的独立环节。由于一些国家迟迟未就乏燃料组件的最终处置问题作出决定，贮存的乏燃料数量不断增多。不管选择何种管理方案，都必须进行乏燃料贮存，或在堆（at-the-reactor）贮存或离堆（away-from-the-reactor）贮存。

早期的核电厂都建有普通的反应堆乏燃料贮存池，其贮存能力为整个堆芯燃料的 $2/3$ 到 $1\frac{2}{3}$ 。当时预计，经过 2—3 年的初期冷却后，乏燃料将送往后处理厂。原来的后处理计划被推迟后，人们修改了乏燃料贮存方案，以增大同一场地上现有的贮存能力。

另一方面，看来有可能采用其它的乏燃料贮存方案。这些技术包括采用两种长期的、单独的乏燃料贮存方法——干法和湿法。预计这些贮存库将是一些大型的集中化设施，它们可以贮存若干座反应堆的乏燃料。目前，单独的乏燃料贮存库正在日益成为核燃料循环中的重要设施，因为在后处理或最终处置之前，大部分乏燃料将在那里贮存很长一段时间。

乏燃料湿法贮存仍是最主要的贮存方法，在这方面已有长期的成功经验可以借鉴。一些欧洲国家已设计出各种不同的湿法贮存设施，这些设施有的已经建造，有的将要建造（在法国、德意志民主共和国、瑞典、联合王国、苏联等）。

目前，乏燃料干法贮存正在接受作为水冷池的一种替代方案以及作为乏燃料最终处置的一种方法的评价。许多国家，如加拿大、德意志联邦共和国、西班牙、瑞士、联合王国和美利坚合众国，都在实施和研究干法贮存计划。

贮存的乏燃料的安全保障

对乏燃料的安全保障是核燃料循环设施执行安全保障制度的一个必不可少的组成部分。虽然原子能机构一直十分重视制订乏燃料贮存的安全保障程序，但是，由于出现了上述情况，目前乏燃料贮存的安全保障正在变成一个特别重要的问题。

几年前，原子能机构秘书处开始研究制订单独的乏燃料贮存设施的安全保障方案。与此有关的许多任务，正按德意志联邦共和国、美国和苏联对原子能机构安全保障的支助计划逐步开展。1983年，在苏联召开了一次会议，讨论与计划在一些经济互助委员会（CMEA）成员国中建造的具有特殊设计的湿法贮存设施有关的安全保障问题。1984年，原子能机构组织了一

Pushkarjov 先生是机构安全保障司系统研究科科长，Tkharev 先生是该科成员。

照片说明：瑞典乏燃料离堆贮存设施（CLAB）内景，一个运输容器正被放入水池中（来源：瑞典核燃料供应公司）

次顾问会议，讨论与离堆贮存有关的安全保障问题以及这个领域中的未来趋势。

所有这一切，都极为强调与乏燃料安全保障及其实际实施有关的问题的重要性。

贮存的乏燃料的安全保障程序

按照材料衡算管理对核燃料循环设施进行分类，乏燃料贮存设施是一个记件设施。这就是说，所有的核材料在设施中停留期间都包含在可识别的物件（如

燃料组件，加封的容器或乏燃料组件容器）中。通过测量或估算应得知每一物件中含有的核材料的数量。而且，只要物件保持完整，核材料的含量就应是恒定的（或者只按已知的方式变化，如由放射性衰变而发生的变化）。（见附框中安全保障的基本概念。）

在这种情况下，原子能机构的安全保障就建立在物件衡算程序基础上，它包括：物件清点和识别，物件连续完整性检查以及无损检验。封隔和监视（C/S）措施是核材料衡算管理的补充，在乏燃料的安全保障中具有特别重要的意义。在国际控制实践中，机构谋求通过核设施的封隔或实体屏障（如墙、运输容器，

安全保障的基本概念

乏燃料贮存设施的安全保障正按原子能机构规约和两个主要协定（INFCIRC/66/Rev. 2 和 INFCIRC/153 [修正]）实施。

INFCIRC/153 型协定所确定的安全保障目的是“及时探知有效数量的核材料从和平核活动转用于制造核武器或其它核爆炸装置或转用于未知目的，并通过及早探知而制止这类转用”。在按不扩散核武器条约体制达成的一些安全保障协定（INFCIRC/66/Rev. 2 型）中，虽然没有关于安全保障目的明确定义，但在目前实践中应用的基本上是上述的这些概念。

在国际安全保障的实施中，机构以下述三个基本参数为基础的技术目标（“探知目标”）为指导：

- 核材料的有效数量
- 探知时间（转用和原子能机构探知转用之间可能经过的最长时间）
- 探知几率，它确定原子能机构安全保障措施要求的可靠性。

在设计乏燃料贮存设施安全保障方案和评价所取得的结果时，原子能机构为与乏燃料有关的三项探知目标规定了如下数值：

- 有效数量：8 公斤铀（所有同位素）；含在高浓铀（浓度大于或等于 20%）中的 25 公斤铀-235；含在低浓铀（浓度低于 20%）或天然铀中的 75 公斤铀-235。
- 探知时间：对乏燃料中的铀和高浓铀为 1—3 个月，对低浓铀中的铀-235 约为一年。
- 探知几率：90 到 95%。

以探知目标为指导，机构起草每个设施的视察目标，起草时考虑实际运行条件、安全保障协

定条款以及实施安全保障措施的现实技术可能性。

原子能机构安全保障的基本概念是核实根据安全保障协定接受保障的核材料未从和平的核活动中转用于其他。实际上，这种核实是通过定期视察来实现的，而定期视察的频次取决于探知时间的长短。

原子能机构的核实是以核材料衡算为基础的，这种衡算是基本而且重要的安全保障措施，同时以封隔和监视（C/S）作为重要的辅助措施。这包括检查操作员的记录和现存核材料量及其利用情况的报告，以及由机构单独进行测量和观察。

作为发展安全保障计划的第一步，为一个特定的设施类型设计了一个安全保障方案。为了达到核实目标，将这个安全保障方案设计成一个核材料衡算加上封隔和监视措施的系统。在这种设计中，考虑了这些测量系统的能力、设施设计特点以及设施的实际情况。

为了简化乏燃料核查，研制了一种测量总 γ 和中子的 Ion-1 探测器（图为正在对此进行安全保障培训）。



贮存容器等)的使用来阻止或控制人们移动或接触核材料。机构还通过监视手段,如摄像机或摄影机,利用器件和(或)视察员观察收集资料,以发现对核材料没有声明的移动、破坏密封、伪造与核材料存放场所和数量有关的资料或破坏原子能机构安全保障器件的行为。

将作为核材料衡算管理辅助措施的封隔和监视相结合,可以不断获悉被核查核材料的情况:物件完整性和核材料的移动。这些措施最理想的结合,可以以可接受的费用以及对装置正常运行的干扰最小的方式,达到安全保障目的。

原子能机构的乏燃料安全保障经验

必须了解,在对某一个具体设施实际实施国际安全保障计划时,关于乏燃料安全保障的基本概念只能起指导作用。首先,新燃料辐照后,反应堆便出现乏燃料,然后乏燃料要在反应堆现场贮存一段时间。此后,根据所选择的方针,乏燃料或送往后处理厂,或送去中间或长期贮存以便将来进行后处理或最终处置。很显然,在每个阶段,实际的安全保障措施会因设施类型、设施的设计特性和状态,以及乏燃料贮存期的长短而大不相同。如果将乏燃料从一个核设施运往另一个核设施,则在为所涉及的每个设施设计安全保障实施方案时,就要考虑相应设施间的内在联系。

在原子能机构实施安全保障的很长一段时间里,只是在反应堆现场的贮存池才有受国际管制的反应堆辐照燃料。在后处理设施已接受机构安全保障的70年代后期,原子能机构开始在管制这类设施的缓冲贮存装置中的辐照燃料方面取得经验。此后,机构积累了经验并制定了这类贮存的安全保障方案和程序。最近,第一批离堆长期贮存设施已在一些国家兴建,并且现在已接受安全保障。

下面各节简要介绍在不同核设施针对乏燃料实施安全保障的可能方法以及原子能机构取得的经验。

在动力堆现场的贮存

在大多数反应堆中,辐照过的反应堆燃料贮存存在水池中,水起冷却和适当屏蔽作用。目前,约有100个这样的反应堆现场贮存设施处于原子能机构的安全保障之下。

原则上讲,只要在所有反应堆贮存池装备适当的仪器和设备,就可以对这些贮存设施实施各种衡算管理措施,如物件清点、识别和无损检验测量等。在贮存区可以使用不同的封隔和监视手段,如使用摄像机、摄影机和封记,作为辅助措施。当封隔和监视手段失效时,可以使用无损检验来再次核查乏燃料的存量。

国际原子能机构通报, 1986年春季

下面给出几个不同动力堆设计概念的具体安全保障特点:

- 轻水堆(LWR)。轻水堆现场乏燃料贮存设施预计是一种短期贮存设施。乏燃料从反应堆中卸出后贮存于水下,通常是放在“篮子”里,使燃料组件竖立,以便于清点和识别。装运前的最短贮存时间在90至180天。但是,目前由于后处理能力不足,许多燃料要贮存更长的时间(数年)。大多数反应堆贮存设施的设计贮存能力约为2—4倍于整个堆芯的燃料。

所有轻水堆燃料组件的顶端都打有标识序号。理论上讲,这种序号在辐照后处于典型乏燃料贮存条件下是可读的。但在实践中,有些贮存条件有时使这种可读性变得不太可靠。轻水堆芯的再装料一般每12—18个月进行一次。在换料期间,乏燃料从堆芯运到贮存池,视察员就在那里对乏燃料进行核实。除反应堆换料时间外,乏燃料的流动只发生在运往后处理厂或长期贮存设施的装运期间。

- 重水堆(HWR)-坎杜(CANDU)型。在设计坎杜堆时并未假设将来要进行后处理,因此,预见到了乏燃料的长期贮存问题。乏燃料贮存池的贮存能力因堆型不同而大小不一,但在任何情况下都可以通过增加辅助贮存设施来增大贮存能力。坎杜型多机组电站的主贮存池一般都具备约1年的贮存能力。燃料束水平存放在容器(架、篮或舱)中,以便于堆放。此后,贮存的燃料将通过水下通道运往辅助贮存区,这个区拥有30运行年的贮存能力。

由于特殊的设计特点(即:不停堆换料,乏燃料存量,不易接近作存量的例行测量),针对坎杜堆制定的安全保障方案采用了一些独特的仪器和技术。虽然坎杜堆安全保障方案平时采用核实乏燃料流量与封隔和监视相结合的方法来核查乏燃料存量,但是对存量作物件盘存和流量核实构成了安全保障方案的基础。在辅助贮存区内采用加封记的办法将大大减少核实存量需要进行的视察工作。

- 气冷堆(GCR)。原子能机构对具有气冷乏燃料贮存库的核反应堆实施安全保障的经验是有限的。在气冷堆,目前只有三座这样的贮存库,另外还有一个在混凝土罐中试贮存辐照过的反应堆燃料的示范设施。由于辐照燃料后处理的推迟,目前已做了许多工作来增加现有贮存库和正在反应堆现场建造的贮存库的贮存能力。在提出的技术解决方案中包括:提高贮存密度,增加第二层贮存架和将乏燃料棒放入特殊的容器中使其密排。这些方法将给核查带来额外的困难,并将影响实际视察工作。在设计安全保障实施方案时要考虑这些变动,有时还需要发展新的安全保障方法和技术。

在后处理厂贮存



为不停堆换料的坎杜堆研制的乏燃料棒束计数器。(来源：加拿大原子能有限公司)

在设计乏燃料后处理厂贮存池时，通常假设接收的乏燃料会很快予以后处理。燃料贮存设施有足够的空间，可以贮存相当于后处理厂3—4个月的处理量。后来设计的一些大型后处理厂，预计后处理前乏燃料的缓冲贮存时间长达数（4—5）年。

后处理厂接收的燃料组件都装在带屏蔽的运输容器中，其典型重量为20—100吨，装10—20个组件。在贮存池中，乏燃料组件可以放在简易的容器中，这种容器可以使组件保持竖立并保持核安全所要求的间隔，为吊运方便或其他原因，也可将乏燃料组件放在各种篮框或容器中。这些特殊容器往往是安全保障所关注的，因为它们盖住了组件上端，无法用肉眼观察组件上的序号，无法进行切伦科夫辐射观测，甚至连组件也看不见。

如果能接近贮存池中的乏燃料组件进行直接核查，那么从原则上讲，这里的视察程序与在反应堆现场乏燃料贮存设施实施的视察程序相似，尽管工作量可能大得多。在其他情况下，当燃料组件贮存在封闭的特殊容器中不能接近去核查时，这些贮存容器便被当作材料衡算管理的基本物件，假设容器中的材料由视察员在装运前在反应堆现场立即核实然后加封，或在后处理厂接收时立即核实，然后加封。

考虑到后处理厂的经营体制，在核查由贮存区到处理区的乏燃料流量时，要将物件衡算和散料衡算结合起来。

乏燃料的长期贮存

机构在对反应堆和后处理厂的湿法贮存设施实施安全保障方面取得了一些经验。看来，用于各个长期的、单独的湿法贮存设施的安全保障程序都是大同小异的。不过，乏燃料贮存期的延长，长期的、单独的贮存设施的容量以及它们的设计特点都给在这类设施上实施安全保障带来了新的问题。

以衡算管理措施为基础的核查程序限于一些湿法贮存设施，这是由于设计特性和实施无损检验测量的技术可能性有限所致。再者，这些测量（在可行的地方）看来很费时间，因为在这些设施中贮存的乏燃料组件非常多（达数千件）。在某些情况下，当乏燃料贮存在特殊的贮存篮或多元件“罐”中时，即使是物件清点和组件识别也非常困难。

就干法贮存来说，情况就更复杂了。在这里，实际上不能用衡算措施来核查乏燃料，因为不能实际接近这些核燃料。基于这些事实，对于在长期的、单独的、湿法和干法的乏燃料贮存设施实施安全保障，封隔和监视措施的作用正变得极为重要。

幸好，乏燃料组件长期处于固定位置，这就为封隔和监视措施的实施提供了有利的条件。应对贮存设施实施多种封隔和监视措施，使有关的封隔和监视器件没有常见的失效方式，而且具有高水平的技术性能和冗余度。

由于同样的原因，确定反应堆现场贮存设施中辐照燃料的初始存量也是一项要优先考虑的工作。这对于干法贮存设施尤为重要，在这里，运抵的运输/贮存容器不能再打开核查。为了完整而连续掌握核材料从反应堆转移到贮存设施的情况，运输容器应有可靠的密封系统。

很显然，同乏燃料从反应堆现场转移到长期贮存设施有关的操作程序将对安全保障视察方案产生很大影响。在设计安全保障方案时，要考虑装运（反应堆）和接收（贮存）设施之间的内在联系，以便使视察工作量达到最优化，并有效地实施安全保障。

看来，要保证乏燃料从反应堆装运和在贮存处接收期间视察员定期亲临现场，就需要大批视察员。先进的封隔和监视技术的发展可以解决这一问题，并有利于减少对视察员的需求。根据对机构的支助计划目前正在研制的两种特殊器件就是这些新技术的一例。这两种器件是乏燃料组件计数器和电子密封系统，它们能记录下贴附在运输容器上的封记的所有开闭次数。利用这些器件收集的信息和由设在反应堆和贮存库两类设施中的监视摄影机提供的信息，可以不断掌握乏燃料从反应堆运至贮存库的情况，而无须视察员到设施现场。

上述器件对安全保障来说具有概念上的意义，它们构成了对乏燃料贮存设施实施安全保障的一些新设想的基础。这些器件的实际应用，要根据实际情况和

将来对这些器件的技术性能、可靠性和抗破坏性的试验结果，作适当的分析。这些技术在特定设施中应用的可能性还将取决于这些设施的设计特性。

设计导则

所有的核设施都要受到经济上、技术上、法律上、保安上、安全上、环境上和其他设计方面的许多限制。设施设计组的任务，就是寻找在某种意义上是最优的设计方案。对于核设施来说，在设计阶段应当尽最大可能予以考虑的另一问题是如何便于安全保障的实施。对于乏燃料的贮存设施尤其应如此。在这里，隔离和监视措施具有特别重要的作用。在机构主持召开

的若干次会议上，对这个问题进行了充分的讨论。成员国已经表示理解这一问题的重要性，并正在考虑乏燃料贮存设施早期设计阶段的有关导则和建议。

令人满意的应用

本文介绍了乏燃料安全保障的一些概况。当然，它们并未反映出有关乏燃料的国际安全保障制度的全部细节和特点。在反应堆现场贮存和后处理厂缓冲贮存方面，原子能机构已有一套经过考验的安全保障实施方案。现行安全保障技术可以令人满意地应用于乏燃料的长期贮存设施，来达到安全保障的目的，尽管这些设施具有一些独特的特性。

