

管理方面的研究和发展计划、经营方面的活动以及重大事件。

一开始的目标将是收集拥有运行和（或）在建核动力厂的 31 个成员国的废物管理概况。此目标达到之后，将致力于收集只有核能应用放射性废物的成员国的概况，并把它们输入数据库。虽然此系统的某些部分不久就可以被利用，但预期整个 WMDB 将于 1990 年后期才可以正式使用。

机构将利用此数据库快速存取成员国在此领域中的各项活动的信息，因而可以加强机构的废物管理计划。数据库中的信息将用于编写国际上放射性废物管理动向方面的报告，和帮助机构规划和发展其废物管理计划。欢迎所有成员国参加该数据库的开发和使用，并在规划和实施本国的废物管理计划时利用此数据库。

结束语

由于成员国经常根据废物管理中遇到的技术问题和公众认可问题调整自己的行动，因此放射性废物管理是一项总在变化着的活动。有鉴于此，机构的废物管理计划必须要有灵活性，以便能用及时而有益的活动对成员国的需求作出响应。本文所描述的新项目，就是不断地进行评价以便改善服务的这一过程的结果。对成员国来说，不管其废物管理计划的状况如何，这些服务应该或多或少是有用的。此种评价过程将继续作为机构的法宝，以便确保有限的资金能被用于使成员国直接受益的和重要的活动上。

放射性废物处置技术现状

各类放射性废物能够

并正在被安全地贮存和处置

Alf Larsson

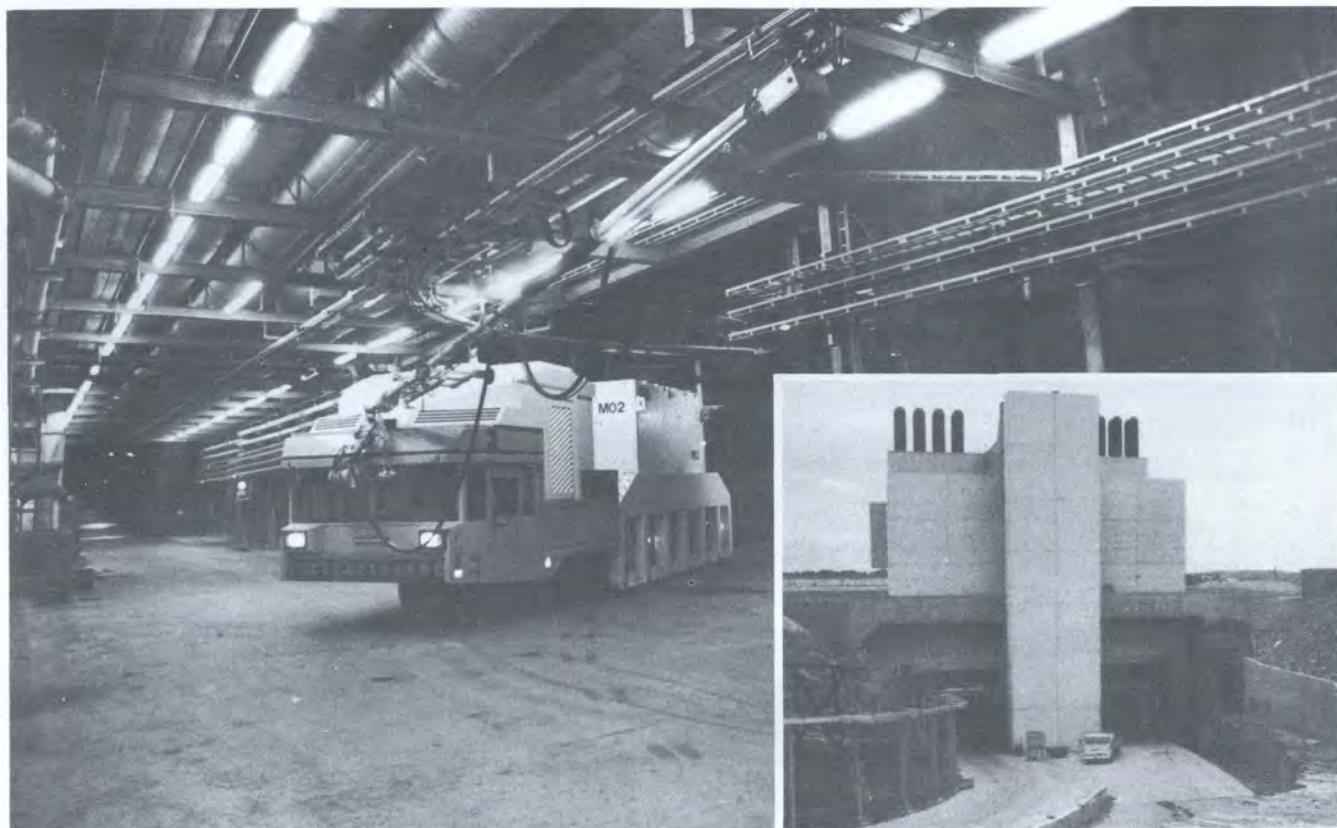
鉴于开发放射性废物处置库需要做大量的工作，因而在这个领域内已经开展了广泛的国际合作。这项工作也已引起国际原子能机构（IAEA）的极大重视。机构已出版了若干份涉及废物处置不同方面的报告。机构根据其“地下处置技术审查委员会”（TRCUD）的一项建议，将发表一份题为《放射性废物处置技术现状》的报告。该报告仍处于编写阶段，本文介绍未来这篇报告中的几个基本议题。

放射性废物和核燃料循环

在核燃料循环中，铀矿石的开采和水冶、铀浓缩过程、燃料制造、核反应堆运行、乏燃料后处理和核设施的退役，都产生放射性废物。对拥有核动力计划的国家来说，核废物的安全管理和处置，具有头等重要的意义。对于在医院和研究所里利用放射性物质的其他一些国家来说，尽管规模较小，但也面临着同样的问题。在放射性废物处置方面，已经提出了几种可供选择的方案。除了有几项看来利用现有技术无法实现的奇特建议（例如将废物送到太阳或外层空间，或在高通量中子反应堆内使之嬗变）外，就放射性废物

Larsson 先生是瑞典核动力检查局（位于斯德哥尔摩）核废物处前主任，并且是 IAEA 地下处置技术审查委员会前主席。该委员会的工作后来归入 IAEA 的国际放射性废物管理咨询委员会。后者成立于 1989 年，其任务是对机构在放射性废物管理的各个方面的工作提供指导。





瑞典的低、中放废物处置库位于福尔马克核电站附近。该库建在一个挖掘的岩洞内，1988年启用。（来源：SKB）

的管理而言，存在着有两种本质上不同的原理——分散和封闭。

分散是指在正常情况下以受控的方式将放射性核素释放到环境中去，使之不对人类和大自然产生任何有害的影响。

封闭是指把放射性核素与人类环境隔开，不让它们以不可接受的数量或浓度释放到环境中去。

为了能遵守国际放射防护委员会（ICRP）出版的推荐书中的各项原则，分散只能用于放射性核素数量有限和浓度较低的情况。目前，核反应堆和后处理设施的废物处理车间流出的浓度非常低的放射性废液，就经常排入河流和海洋。多年来，分散也一直以将低水平放射性物质倾入海洋的形式被用于处置固态废物。由于广大公众的反对，这一做法最近已被放弃，至少是暂停。

对于绝大多数放射性废物来说，把它们封闭一段时间是必要的。时间的长短取决于废物的特性，最重要的是它的核组成。含有短半衰期核素的废物，只需要封闭比较短的一段时间，最长几百年；而长寿命核素可能需要封闭数万年或更久。当然，大家也认识

到，很久很久以后（在某些情况下也许是几百万年），封闭得最好的放射性废物都可以被释放和分散到环境中去。不过，到那个时候，放射性将已经衰减到非常低的水平，并能低于可接受的国际剂量标准。

封闭所用的基本安全原则是“纵深防御”。这个原则的意思，通常是利用若干道原则上独立的“屏障”去延迟或阻止废物或处置库中的放射性核素迁移到周围环境中去。就深地质处置库而论，以主岩和周围的地质层为天然屏障。专设屏障是指人造的或人工改造过的物项，它可以是废物包的一部分或处置库的一部分。

放射性废物处置库大致可分为三类：近地表处置设施，中等深度的处置设施，深地质处置设施。在近地表处置设施中处置低放废物，已积累了大量经验。中等深度的处置正在付诸实施，但规模不大。而深地质处置库，一般还都没有使用。

高放废物和乏燃料的处置库，绝大多数处于研究和规划阶段。为了开发出有关的选址方法学和为这类废物找到合适的场址，还需要做大量工作。许多国家已为高放废物的处置设立了庞大的研究和开发计划。

天然屏障

由主岩做天然屏障是把这种处置库称作地质处置的主要理由。屏障的定义是延迟或阻止废物和(或)处置库中的放射性核素迁移到周围环境中去。

为了评价天然屏障以及专设屏障的有效性,必须研究这些屏障的实体隔离、水文地质和地球化学的特性。此外,还必须考虑放射性核素在生物圈中的行为,例如,在土壤、浅蓄水层和地表水、大气和食物链中的稀释和扩散。

将废物处置在地下,利用覆盖岩层作为实体屏障,以防止各种侵袭过程引起放射性核素释放到环境中去。此类过程有故意或无意的人为侵入、着火、飞机坠毁、洪水泛滥和飓风等。地下构筑物不易遭到地震的破坏,岩石还可起辐射屏蔽和辐射热吸收体的作用。

一般来说,废物隔离的有效性,以及水文地质和地球化学方面的适宜性,随着废物放置深度的增加而增加。当然,这一点必须结合温度、工程可实施性、运行安全性和各种费用所引起的制约因素进行通盘考虑。选择处置库具体深度的准则,与废物类型、处置方案和主岩的关系极大。这就是说,必须为每个场址制定专用的准则。

近地表处置库因狂风暴雨和地震之类的自然事件而失去隔离能力的风险往往较高。这类处置库的隔离往往只依赖专设屏障,很少依赖陆界。这就意味着,专设屏障一出现故障,废物就会直接进入生物圈。对于短寿命废物,这种情况或许是完全可以接受的,而对于长寿命废物,情况就不同了。

水文学。引起放射性核素从处置库中释放出的最可能机制是地下水的侵入。对于深部的处置库,主岩的所有水文特性都是头等重要的特性。表征水文特性的基本参数是水的流量、流速和流动路径。这些参数取决于该区域的水压梯度和主岩及周围地层的孔隙度和渗透性之类的特性。这些水文特性是建立该系统的数学模型所必需的。

人们正在考虑将盐矿和硬石膏矿作为干岩石型高放废物处置库主体地层的可能性。尽管所有的岩石都含有水,但盐或硬石膏之类的岩体没有看得见的相互连通的充水孔隙,连通的充水孔隙能给已溶于水的放射性核素的迁移提供通道。然而,在处置库建造期间的机械扰动或辐射产生的温度场都会使任何液态包体

有所移动。在通常的渐变过程中,只要主岩完整无损,就不会从这样的处置库里释放出任何放射性物质。美国的 WIPP 设施就是一个建在层状盐矿中的处置库实例。德意志联邦共和国的戈莱本设施是正在研究能否在这个盐矿洞穴中建造处置库的另一个实例。

在干燥地带,某些近地表处置场和深部处置场也许位于潜水面以上。因此主岩不饱和,也就是岩石中连通的孔隙中没有完全填满水。不饱和的程度随系统的不同而有所不同,实际上还随季节而变。在此种岩石中,往往能找到比较干燥而且水的迁移速率非常低的岩层,因此这种岩石是具有吸引力的废物处置候选场址。即使水发生迁移也都是通过微孔系统进行的,这个系统存在着多种吸附过程,给阻滞放射性核素的迁移提供了巨大的潜力,对各类胶状物质也能起到过滤器的作用。美国内华达试验场的尤卡山就是一个不饱和带处置库场址的实例。这里的岩石由致密熔结的流纹状凝灰岩组成。

当今世界上,废物处置方面的多数工作集中在饱和岩方面,因为在有核计划的大多数国家中,这类岩石是常见的。饱和岩通常被称之为多孔的或破碎的岩石。

理想地说,多孔岩在结构上不该有大的不连续处;水的流动(或核素在水的流动可忽略情况下的扩散)应该在整块岩石内的各处都是均匀的。水通过这类岩石的速度应该非常低,且整个岩石基质都具有吸附能力。但在实践中,多孔岩往往被性质上与主岩差别相当大的岩层所包围,因而它的水文特性变得极为复杂。

在许多岩石中,水的流动绝大部分发生在性质明显不同且互相独立的岩石之间(一般称之为“断口”)。这类断口包含有各种各样的地质不连续性。由于此类岩石(如花岗岩和粘土)的水流量小且流速低,因而它们的整体水文特性是相当有吸引力的。然而,在它们的水文特性的表征方面还有许多困难。

一些国家,例如加拿大、瑞典和瑞士,都有在饱和岩中建高放废物深部处置库的大规模开发计划,包括进行场址调查研究和建立地下实验室。瑞典 SFR 中低放废物地下处置库,就是这样一个建在饱和岩中的正在使用的设施。

地球化学。主岩的地球化学特性,能提供一个放慢或阻止各种专设屏障退化的环境,因而使主岩本身

成为一道屏障。一旦该处置库的封隔能力丧失完整性，这道屏障还能限制放射性核素的活动化作用和输运速率。特定的地球化学系统的特性，与废物的类型和处置库的设计关系极为密切。

选址。放射性废物处置场址的选择和特性鉴定要经过若干个阶段。首先，要进行勘查，以便按照为处置库规定的准则鉴别出可能合适的、大致的地区。然后，选择两三个地区作进一步的研究。一般都要进行野外研究，若是地下处置场，为了了解该场址的特性，还必须钻孔。制作水文学的模型是水文特性表征工作的主要部分。

虽然把处置库场地选在远离火山岩区显然是有好处的，但大断层的准确位置并不那么清楚。尽管由于大断层是一条潜在的运移通道，因而人们显然不希望这种大断层穿过处置库；但它同时也提供了一个薄弱之处，当构造应力累积到一定程度时可沿着此处发生错位运动，从而减少了在该处置库区出现新裂缝的几率。此外，处置库周围的主断层往往能使处置库与潜流隔离。这种推理方式的例子可在瑞典 KBS-3 的研究报告中找到。*

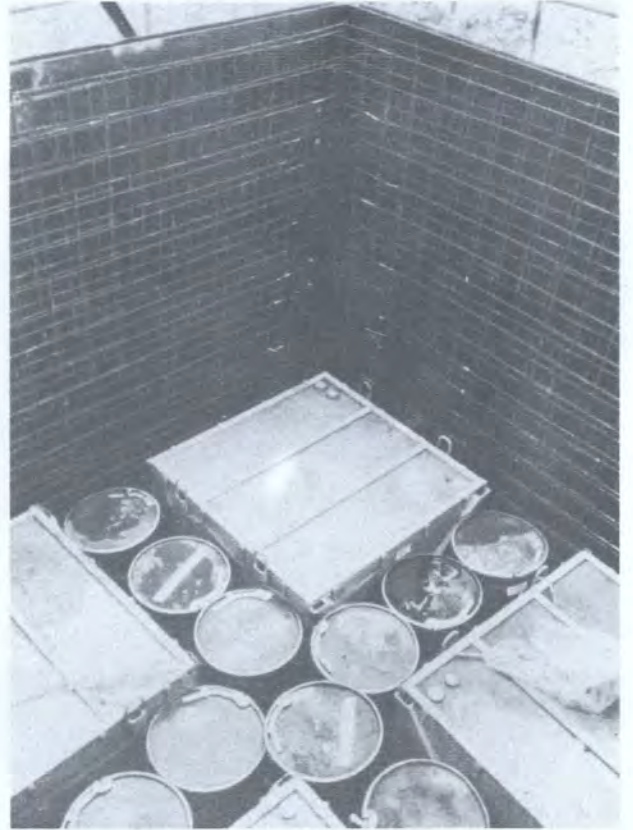
对于各种类型的处置库，特别是近地表的处置库，人为侵入的情景必须认真地加以考虑。把库址小心地选在远离天然资源区，可将这类风险减至最小。

预测处置系统随时间的演变情况，是一个关键的大难题，这种情况既适用于生物圈也适用于陆界。就实体隔离而言，最重要的过程通常是侵蚀。这类侵蚀先天地取决于大地构造过程和气候条件，因为它们影响水文特性，进而影响地球化学特性。

专设屏障

专设屏障的定义是人造的或人工改造过的物项，它可以是废物包的一部分和（或）处置库的一部分。处置库中专设的构筑物所起的作用很多，对于不同类型的废物和不同的处置库方案，这些作用的含义可以不同。

* *Final Storage of Spent Nuclear Fuel — KBS 3*, 4 vols, Swedish Nuclear Supply Co. SKBF / KBS Sweden (1983).



法国芒什处置场建有完善的专设屏障，以阻止放射性废物逸出与地下水接触。(来源：ANDRA)

废物基体的主要作用是在考虑到基体会缓慢退化的情况下，把所含放射性核素的释放速率限制在某个值以下。若要求基体具有长期的稳定性，则需要了解基体退化的机理，为主要依靠经验的模拟办法提供证据。对于高放废物，当被处置的是乏燃料时，基体通常就是 UO_2 本身；对于后处理过程产生的废物，虽然有人还正在研究多种替代的废物体（例如合成岩和陶瓷体），但通常用硼硅酸盐玻璃作废物基体。水泥和沥青经常作为中放废物的废物基体。低放废物一般不需要基体。

容器是一种把废物基体完好地隔离一段时间的手段。容器的完整性究竟需要保持多长，这取决于废物类型、场址特性和具体国家的法制。例如在美国，对于高放废物，要求保持隔离的最短时间是 1000 年。瑞典 KBS-3 的研究报告指出，铜容器的隔离时间可长达 100 万年之久。对于低、中放废物，隔离时间的要求不太严格。在这种情况下，容器的主要用途常常是防止污染，便于废物的搬运，以及在废物存放期间起辐射屏蔽层的作用。由于机械强度方面有要求，

高放废物的容器材料一般选用金属。低、中放废物通常用标准的金属桶盛装，但中放废物有时也采用混凝土容器。

设置挡水屏障的目的是确保大部分地下水绕过处置库的专设屏障，而不是穿过它。当近场的渗透性低于主岩的渗透性时，就会出现这种情况。在实践中，使用低渗透性的回填料，例如膨润土和专用水泥，就能达到上述目的。在许多情况下，由于挡水屏障是一种复杂的地球化学介质，因而它还具有减缓从废物基体中浸出的放射性核素的迁移速度的附加功能。

在释热废物的情况下，要将专设屏障设计成能确保处置库或其周围的温度不会高到不可接受的程度，这一点很重要。

有一个因素最近几年已引起人们的注意，即废物处置库中气体生成的潜在作用及其对专设屏障效能的影响。

由于整个专设屏障系统是由许多个小部分组成的，其中的有些屏障同时起几种作用，因而不同屏障之间的相互作用必须加以评估。就深部处置库而言，回填和密封地带的各个界面（尤其是专设构筑物与主岩之间的界面），需要特别加以关注，包括坑道、竖井、钻孔在内的各种开口，在最后关闭处置库前必须填实和封闭。

处置库设计概念

在低放废物的浅地层处置方面，已积累了大量经验。在这类设施中，有许多正在运行，例如在加拿大、法国、英国和美国的许多设施，应该说浅地层处置技术已非常成熟。现有设施的设计是不一样的，这与废物的包装和场址特性等当地情况有关。在有些情况下，象法国芒什（阿格）处置场那样，利用完善的工程设施阻止废物与地下水接触。在另一些情况下，如美国那样，则利用该地干燥的气候条件，使得采用简单的挖沟和回填技术成为可能。当前的倾向是建造比以前的设计好得多的设施。当然，在任何一座浅地层处置库允许投入使用之前，申请单位通常要根据许可证审批部门的要求进行详尽的安全分析，并得到它们的批准。

直至最近，近地表处置一直是处置低放废物方面最流行的做法。这项技术现在有一些可供选择的方案，象建在地面上的混凝土储藏库、地窖和人工挖掘

的洞穴。将中低放废物处置库建在挖掘的岩洞内的实例是瑞典的 SFR 处置库，该库已于 1988 年投入使用。另一个例子是德意志联邦共和国的康拉德设施，该设施差不多已经建成，但尚未获准使用。康拉德利用一个已经废弃但基本上是干燥的铁矿山处置放射性废物。

一般认为，要长期地把含有大量长寿命放射性核素的废物隔离好，只有在深地质处置库中才能实现。一些国家已开辟了开发处置高放废物的深部地质系统的计划。已提出了多种概念设计，它们是这种开发计划的一部分。由于场址和主岩不同，各种设计是而且必然是随场址而异的，但又都是基于多重屏障概念——天然屏障加专设屏障——之上的，以保证该系统具有必要的包容和隔离能力。

美国的 WIPP 设施仍在等待获得它的运行许可证，因而至今还没有一座高放废物处置库在运行，但许多国家都已制订了先进的计划。具体的例子可在德国戈莱本场址的施工研究中、瑞典 KBS-3 研究项目的设计中，和瑞士格外尔工程研究项目的设计中找到。*

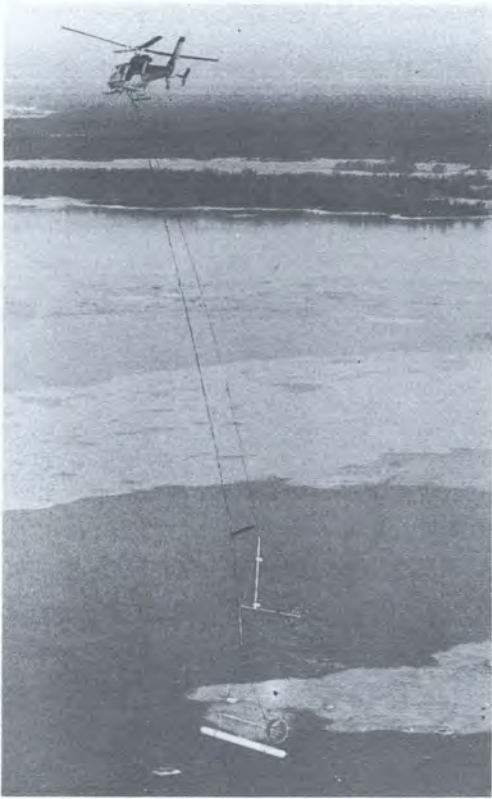
处置系统效能的评估

在有关放射性废物管理的研究和开发工作中，最重要的工作之一是分析放射性废物处置系统的环境影响和评估其效能。完成这些任务有各种不同的方法，但目标是共同的——从现场的和实验室的研究中获取有关的信息，以便对照安全性和可接受性准则评估处置设施的效能。有关的国家机构和国际机构正在制订和修改这些准则。

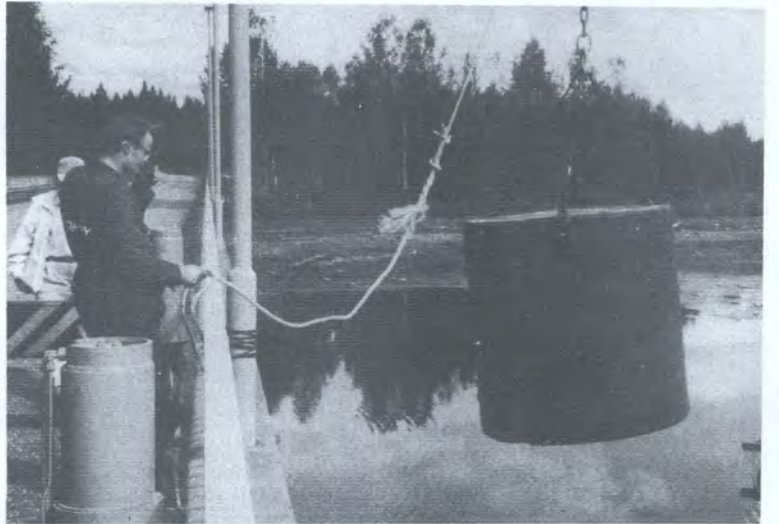
人们认识到，处置设施的长期效能是无法直接验证的，因为我们所处理的是跨越几千年有时是几万年的事。我们必须回过头去使用间接的方法，以对这种处置安排和作用在构筑物上的各种过程的详尽了解为依据，进行预测性的分析。

许多国家正在大力开发用于评估处置库的长期效能的方法。废物处置库方面的安全分析，要求开发能

* "Site investigations and conceptual designs for the repository in the nuclear 'Entsorgungszentrum' of the FGR," Röhmeier, H., IAEA-SM-243, Vol. 1 (1980) 297-30. Also, *Project Gewähr*, 8 vols, NAGRA NGB-89-09, NAGRA, Baden, Switzerland (1985).



芬兰已在核废物处置方面完成了大量的研究工作。已做过的地球物理航测，是场址调查工作的一部分。利用计算机代码研究了地下水的运动情况。另外，还让全尺寸的混凝土废物容器在河里泡了5年，以试验其性能。(来源：芬兰 YJT)



描述真实的处置系统和定量地表示出处置系统中发生的各种过程的模型。为了具备进行此类分析所需要的预测能力，必不可少的事是要设法透彻地理解所涉及各个流程，充分地把正在被模拟的系统表征出来，并建立完整的数据库。

在分析生物圈的行为方面，人们对放射性核素眼下在短期内通过生物圈转移的模式是十分了解的。当然，主要的问题出在生物圈在遥远的将来会演变成什么样子和人类的饮食与生活习惯模式可能会有哪些变化。

总的说来，进行安全分析用的技术可分为两大类：概率分析法和确定论分析法。我们可以把一件事说成在某一时期内具有一定的发生概率，也可以把这件事说成在同一时期内也许一定发生。应该认识到，概率论分析法和确定论分析法是一对互补的技术，在

进行全面的安全分析时两者都应该被采用。

安全评估的目的是证实处置库的效能符合目标值，这种目标值常用可接受性准则来表示。评估一般有两类，一般性的和针对特定场址的；这两类评估通常要交替地进行，直到对该系统有了透彻的了解并能得出结论为止。

一般性的评估对于就某种概念作出决定或在几个概念之间作出选择是有用的，也有助于获得有关部门和广大公众对地质处置概念本身的认可。针对特定场址的评估，是放射性废物处置设施选址、设计、建造、运行、停运和封闭期间的决策过程中不可缺少的组成部分。

在做效能评价时普遍用到的一种技术是制作数学模型，利用它们把对于预测处置库的长期行为有意义的物理和化学过程描绘出来。这样一来，问题就成了

这种模型能否充分地把所有的真实过程描绘好。将预测性分析(模拟)结果与现场的和实验室的观察和测量值进行比较的这种过程,通常称为确认。精心设计和很好地进行的实验室和现场实验,对模型的确认工作是决定性的。某些天然类似物(例如某些铀矿体)的分析结果,也可用于确认目的。不过,就完整地证实处置设施的将来行为而言,“全面的确认”是永远做不到的。在安全分析和效能评估领域内,许多组织,例如经济合作与发展组织的核能机构(NEA/OECD)、欧洲共同体委员会(CEC)以及瑞典核动力检查局(INTRAVAL),都正在进行国际性的研究。*

体制问题

放射性废物的处置,涉及许多必须依靠合理的决策过程加以解决的问题。拥有废物处置计划的国家,大多依靠由管理机构发放许可证的办法管理这些计

划。管理机构的任务是对处置计划的所有阶段进行审查、颁发证书和确保它们的实施。它们可以是国家的一个主管部门,也可以是由政府指定的若干个主管部门。这种管理办法的关键是要有一整套程序,以便指导实施单位的行动、指导管理机构的审查工作和指导其他方面如何介入。

在某些国家,例如美国,政府承担了实施和管理两种职能。尽管如此,在这些国家里,一般说来废物处置的实施职能实际上仍然是与管理职能分开的。

某些拥有核动力的国家,例如芬兰、瑞典和美国,要求电力公司拿出一部分钱作为废物处置的基金。通常,他们按所发出的电的千瓦小时数交款。收集到的基金,一部分目前正在用于废物处置领域的研究和开发工作,剩余部分还足够将来建造和运行必要的处置设施。某些国家,例如瑞典,这笔基金还将负担核设施的退役和退役废物的处置所需的费用。

随着时间的推移,包括废物处置设施在内的核设施,在获得公众认可方面似乎越来越困难了。看来信息交流是个关键。怎样向公众通报核领域的安全事项,是眼下极为重要的一件事,这对核动力生产者、政治家和安全主管机构都是如此。IAEA已花费好多时间,并召开了几次有关公众认可方面的学术会议。

* *Safety assessment of radioactive waste repositories*. Proceedings of the CEC/IAEA/NEA Symposium, Paris, France, 9-13 October 1989 (即将由 NEA 出版)。



一些国家正在地下设施(如比利时的莫尔设施)中开展核废物处置的研究工作。(来源: UNIPEDE)

困难的是，一个国家的解决办法很少能原封不动地适用于另一个国家。

近几年来，在放射性废物管理方面已形成了广泛的国际合作。这类合作不仅涉及诸如 IAEA、NEA/OCED、CEC、ICRP 和联合国环境规划署 (UNEP) 等国际组织，而且还涉及双边或多边的多种合作形式。业已证明，这种合作是非常重要的，所有从事废物处置的单位都正在应用这些共同研究的成果。

结束语

核能未来的发展，取决于我们有没有能力以安全和可被人们接受的方式处理和处置放射性废物。

看来，现在我们已经能够熟练地处置低、中放废物了。必须为每个处置库找到专门针对该场址的解决办法。就这方面而言，除了在获得公众认可方面也许

会遇到困难外，不会碰到大的困难。

高放废物的情况有点不同。这方面的处置技术已经有了，但确保安全性的方法还需要进一步开发。这个问题又是和公众的认可紧密相连的。这种情况导致安全主管部门要求人们建立一个很大的数据库，并对拟建立的处置库进行详尽的安全分析。

鉴于在现场测定方面已经做了大量的研究和开发工作——例如，在加拿大、瑞典和瑞士的地下实验室里进行的工作，再加上在化学、地球化学方面的实验室工作和制作数学模型的理论工作——因而推迟高放废物处置库的设计、建造和运行是毫无道理的。显然，在 2000 年以前，欧洲将不会有任何高放废物处置库正式运行。美国计划在 2000 年左右建成一座高放废物处置设施。这里还必须提一下，从技术和放射学方面来说，及早处置高放废物并不是必需的；经验已经证明，这些废物能够在专设的地面设施中安全贮存几十年。

