

核设施关闭及安全退役

重新审视福島事故

日本福島第一核电站事故爆发后，一些国家开始重新审视本国内的核电项目。德国政府决定全面终止其核电站项目。然而无论其他国家政府如何决定，随着民用第一代核反应堆将达到其预期使用年限，全球范围内需要退役的反应堆数量将会普遍增加。

有 计划在未来十年中陆续关闭将近80座核电反应堆。许多核电厂虽然很有可能会延长其运营许可年限，但总有一天会被退役。这就意味着需要完善各国及国际法规、投入大量资金、革新技术、和培养大量训练有素的工人。

进行核反应堆的退役工作多年来未发生重大辐射事故。然而，我们仍有必要问一下：核反应堆的退役究竟是否安全？像德国那样在全国范围内关闭所有核电项目意味着什么？各国政府是否有了足够的专业知识和基础设施来应对越来越多的需要退役的核反应堆？高不可估的核设施退役成本问题将如何解决？

什么是核设施退役？

“核设施退役”是指各种不同类型的核设备和核基地在达到其使用寿命后，对其进行妥善管理和处置的工作。核设施退役的实施范围包括核电站、核燃料加工设施、研究性反应堆、浓缩厂、核反应和放射性实验室、铀矿和铀加工厂。核动力潜艇和船舶（包括破冰船和航母）

的反应堆也必须退役。其中，民用核反应堆的退役量增幅最大（专栏1）。

核设施退役只是最终关闭核反应堆过程工作的一部分：首先要移除具有高放射性的乏燃料，最后还需清除整个核设备或核基地，包括清除有些情况下受污染的土壤和地下水（IAEA 2004a）。核设施退役需要拆除相关建筑物和其他设备部件，包括在核反应堆中心区域周围的可能已具有放射性的部件，同时也需现场处理建筑材料（大部分是钢筋和混凝土），并把这些材料进行包装和运输，以便安全储存和处理。每一次核设施退役都会面临特定技术上的挑战，可能危害到人类

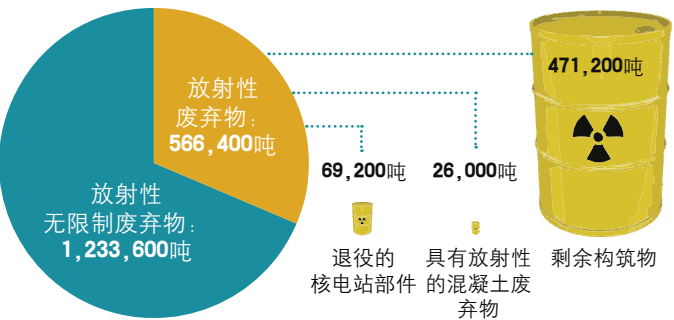


图1：核设施退役过程中产生大量的核废料，包括具有放射性的废料（橙色）和放射性无限制的废料（蓝色部分）。此图基于德国格赖夫斯瓦尔德核电站退役过程中的数据分析。

未来10年内，民用核反应堆退役数量将显著增加
作者：Jon Samseth (主席), Anthony Banford, Borislava Batandjeva-Metcalf, Marie Claire Cantone, Peter Lietava, Hooman Peimani and Andrew Szilagyi
科学作者：Fred Pearce

健康和环境安全。这些挑战和风险取决于几十年前核反应堆的设计和建造方案（核电站在设计时没有考虑核设施退役问题），以及多年来的实际运营情况。

核设施退役过程中产生的废弃物大部分在放射性方面不受限制（图1）。而产生的放射性废弃物主要属于低放射性到中等

放射性（表1）。高放射性的废弃物（乏燃料）都是在核电站运行期间产生的。虽然核设施退役过程中产生的废料放射性强度远低于其运行期间产生的，但退役过程中产生的废料数量巨大。一旦核反应堆被关闭，其放射性强度也将随时间而降低。

核电站退役的现状和趋势

截止2012年1月，全球共有19个国家138个民用核反应堆被关闭，其中美国28个，英国27个，德国27个，法国12个，日本9个，俄罗斯5个（IAEA 2012a）。然而截至本文撰写之时，完成退役的核电站仅有17个。核设施退役不仅程序复杂且耗时长。以英国首座完成退役的核电站为例，这个坐落于萨拉费尔德的核电站在1981年就已经关闭，却到2011年才完成退役（WNN 2011a）。

专栏1：核动力反应堆

压水反应堆是最常见的核反应堆（图2）。在这种反应堆中，容器中的铀燃料发生裂变产生热量并被水吸收，进入蒸汽发生器中产生蒸汽，通过蒸汽驱动汽轮机和发电机发电。蒸汽通过冷却水（河流，湖海或者冷却塔中的水）冷凝成水。

反应堆容器、蒸汽发生器以及某些情况下储存乏燃料的水池（图中未标注）都被放置于一个由厚钢板或混凝土制成的安全壳中，用以防止核辐射泄漏污染环境。反应堆容器本身以及容器内的物质，包括控制棒都将具有放射性，在核设施退役时应格外注意。管道、泵和其他设备，一旦与流经反应堆容器或者储水池的水直接接触，也都会被污染。少量混凝土也可能被污染，因此需深化处理（O’ Sullivan等2010）。

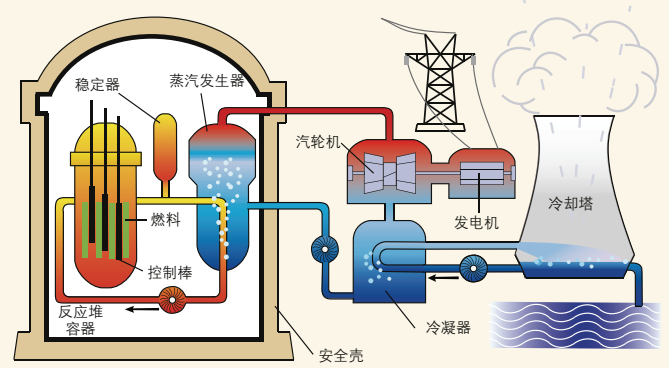


图2：压水堆发电：铀燃料裂变产生热量，促使大量蒸汽产生，蒸汽驱动汽轮机和发电机发电。来源：Kazimi（2003）。

被关闭却没有完成退役的民用核反应堆的数量将会不断上升。同时，军用和研究型核反应堆也有大量遗留问题（专栏2）。典型的民用核反应堆的设计寿命为三十至四十年，全球目前共有435个这样的核反应堆在运行，总装机容量达3682.79亿瓦（图3）。其中，有138个民用核反应堆的使用寿命已经超过30年，有24个已经超过40年（IAEA 2012a）。目前，仍在运行中的民用核反应堆的平均寿命为27年（IAEA 2012a，WNA2011a）。

许多民用核反应堆在达到其预期设计年限后仍然可以继续保持安全运行状态。其中，某些核反应堆将申请延长其运行许可至60年甚至80年（Energetics Inc. 2008）。此外，目前尚有63个在建民用核电站，净发电量可达610亿瓦（IAEA 2012a，WNA2011b）（图4）。所有的核反应堆终有一天会被退役，而退役过程中产生的放射性废料则需要安全有效管理和处置（Bylkin等 2011）。

2011年3月，一场8.9级的灾难性地震伴随15米高的海啸袭击了日本，造成大量人员伤亡。罹难人数过万，房屋和基础设施遭遇了前所未有的破坏。这场灾难性的地震和随之而来的海啸还引发了福岛核电站核泄漏事故，放射性污染物向大气和海洋扩散。该核反应基地及周边环境的污染导致未来的

早年的核能项目遗留了包括核反应堆在内的大批被污染的设施。这些设施有些是民用的，但大多数是用于军事、科研以及展示用途的。在受污染或老化的设施被成功退役之前，其危险性依然存在，并使得公众对核工业产生心里阴影。在反应堆退役工作中，经常会遇到设施历史资料不完整，有关反应堆和设备状况信息不准确等问题。英国核设施退役局报告称，部分核设施“没有关于废弃物的详细记录，有些设施则缺少可靠的设计图纸，并且许多都是一次性项目”（UK NDA 2011）。

美国能源部（DOE）已经开始着手对100多个科研和核武器反应堆旧址进行核污染清除工作，预计到2025年核污染清除面积达几千公顷。这就需要管理数百万立方米的废墟和受污染过的土壤，还包括受污染的大面积地下水区域（Szilagyi 2012）。比如，田纳西州的橡树岭国家实验室管辖面积覆盖15000公顷，有100多个知名的核污染旧址（US DOE 2011）。位于华盛顿州的汉福德核设施也有大量的放射性液体存在（US EPA 2011a）。

几个月甚至几年，核电站方圆30公里将不适宜人类居住和食品生产。日本的发电能力也遭受了严重打击。受该事故影响，有些国家政府已经开始对依赖核能发电的政策产生质疑。但截至目前，只有德国已经决定终止全部核能发电项目

美国能源部已成功清理了一些复杂的核设施场所，如科罗拉多州的洛基弗拉茨核电站旧址（Tetra Tech 2012）。但是有些地方可能永远不能彻底清除核污染。2011年，英国苏格兰环保局指出，试图完全消除敦雷核反应堆周围海岸线和海床地区的核污染将会弊大于利（SEPA 2011）。在许多国家，可能重新利用未完全清除污染的核反应堆旧址，用于开展新的核项目计划（IAEA 2011a）。

用于驱动潜艇或者船只的核反应堆是另一种类型的核设施遗留。退役一艘典型的核潜艇会产生800吨的危险废弃物（Kvarner Moss Technology 1996）。当年冷战结束时，投入运行的和在建的核潜艇超过400艘，主要归前苏联和美国所有（IAEA 2011d）。目前，许多核潜艇已经停止服役，大多数处于待退役状态。美国有部分核潜艇已经完成了退役工作，移除了反应堆，进行了妥善包装，置于汉福德等待处置。1988年以前，前苏联通过倾倒入海的方式处置了从核潜艇上拆除下来的16个核反应堆（Mount等1994，IAEA 1999）。

（BMU2011，WNA 2011c）。而在其他许多国家，针对该问题的争论仍在持续。曾为德国建造多个核反应堆的公司已经发表声明，宣布停止建造核反应堆（Der Spiegel 2011）。随着那些原本预期运行年限更久的反应堆加入退役反应堆的行列，未来待退役的反应堆数量可能大幅增加。

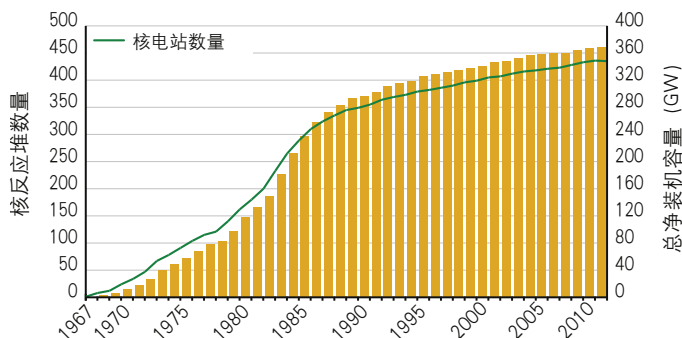


图3：截止2012年初，全球核反应堆的数量已达到435个。与反应堆数量增长相比，总装机容量增速相对更快。数据来源：（IAEA2012）。

“核设施退役”的三种方法

核 反应堆拆除的三种方法：立即拆除、延缓拆除和封固埋藏。任何一种方法均要求对核设施的关闭时间以及核电站旧址今后的用途提前做出明确的决定（图5）。除此之外还需要大量资金投入，专业技术人员，合理的监管和相应的废弃物存储和处理设备（IAEA 2006）。

立即拆除法：移除核基地中所有设备、建筑物和其他设备部件（或者清除核污染），这样，处理后的核电站旧址可以



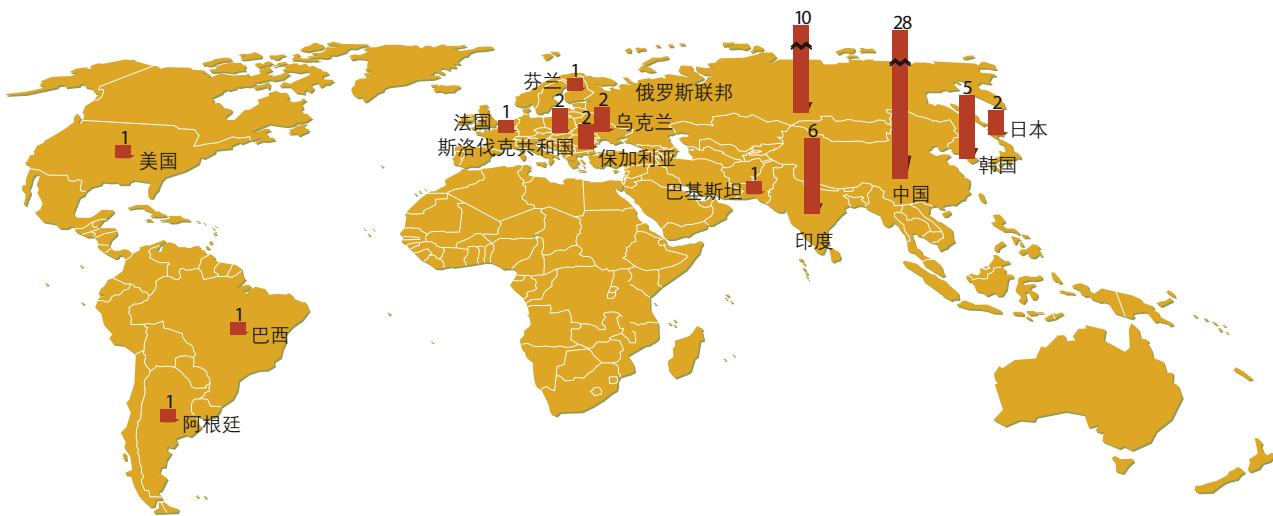


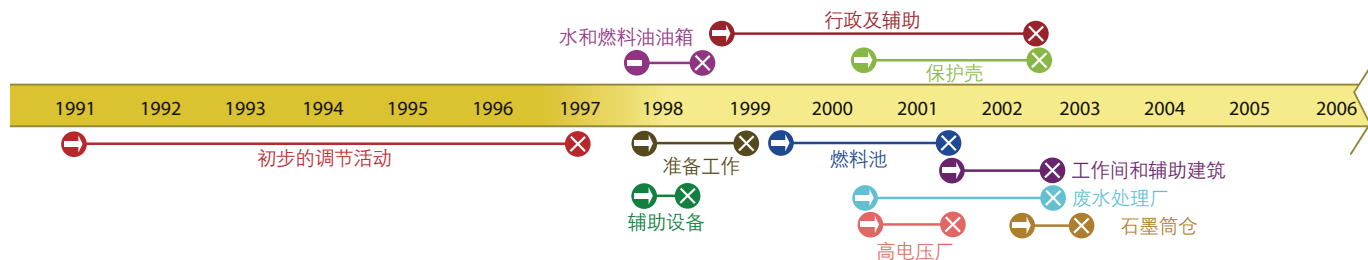
图4：在建的63个核反应堆，大多数集中在中国、印度和俄罗斯。来源：IAEA（2012）

作为未受污染的场地不受限制或者加以限制使用（有时被称作“绿地”）。此项得到国际公认的方法的优势是，经验丰富的操作工人可以参与整个拆除工作，他们熟悉核电站的历史，包括以前发生的任何使拆除过程更加复杂的事故。立即拆除法不但避免核反应堆零件的意外腐蚀，也可避免核反应堆零件随着时间流逝而降解，还可以消除日后核泄漏的危险，避免土地寸草不生。立即拆除也存在缺点，即核反应堆部件的辐射强度要高于延缓拆除法。这就意味着在拆除过程中，必须进一步加强防范。同时，需对产生的大量废料根据放射性强度进行分类。

延缓拆除法：在移除所有乏燃料后，排空管道，确保设施安全后再进行拆除工作。这一方法也常被称做“安全封存法”，延缓年限为10到80年不等（Deloitte 2006）。例如，荷兰的多德瓦德反应堆于1997年关闭，但是直到2047年才会完成

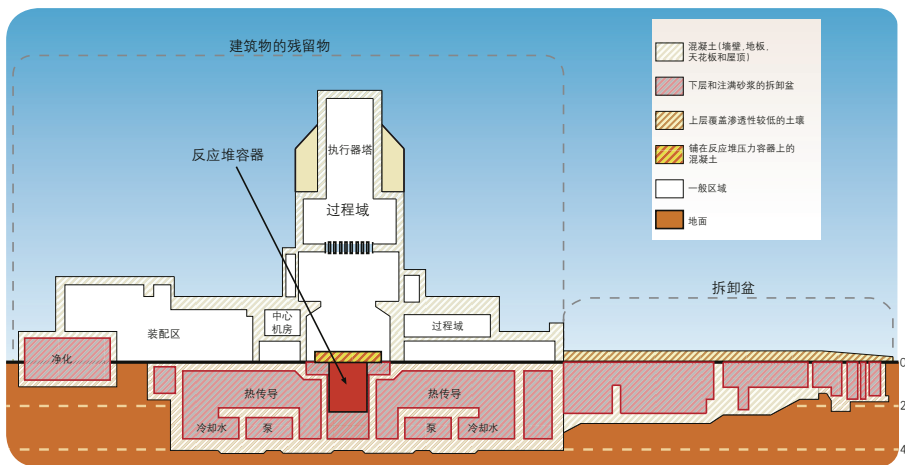
拆除工作（IAEA 2004b）。和立即拆除法相比，延缓拆除法的优点是放射性物质的放射性会随着时间流逝而减弱（专栏3），这样不但减少了清理难题，还降低了对工人健康造成危害的风险。同时，机器人技术以及其它技术的进一步发展，可使拆除工作更加安全并降低成本。但这一方法的缺点是耗时长，会使一些包括混凝土和钢铁在内的材料变质腐坏，让最后的拆除工作更加困难。此外，熟知核设施历史的人员可能会随着时间流逝而陆续离世。

封固埋藏法：一旦乏燃料被移除，反应堆就可以被填埋。这就要求将反应堆封存在如混凝土那样坚固耐久的材料结构中，直到其放射性衰减。封固埋藏法是比较新的方法，且主要用在特殊的案例中（比如小规模研究型反应堆或在边远地区的反应堆）。由于使用该方法所需处理的受污染材料数量较少，因此也减少了工作人员在拆除过程中的受辐射量。然





拆除前的核电站



固封结构的截面图

图6：美国萨凡纳河边的核反应堆，封固埋藏法。所有乏燃料和其它高辐射废料，以及经评估污染物量超过可接受范围的部分废料/污染物从反应堆中移除。随后的固封要求向存在污染物的地下空间注入专门的砂浆。地表以上未受到污染的地区通常无需进行处理。为了进一步防止流水入侵和渗透，建筑物虽然没有被拆除但受到了长期的监控。

而，封固埋藏法需要长期维护和监测。在美国已有5个核反应堆进行了固封埋藏处理法，其中两个在萨凡纳河沿岸的反应堆于2011年完工（图6）。

核设施退役中的挑战

尽管在核设施运行过程中，偶尔发现未知的污染物，但是核设施退役工作都已完成，并未产生额外的健康和安全隐患，也没增加环境风险（WNA 2011）。然而，这仍然需要建立一套完整的法律体制，来明确包括监管部门在内的各个参与方的责任。否则，随着待退役核设施数量的增加、某些国家在加速退役核电站、缩短工期和削减经费方面压力的增加，以及那些毫无处理废弃物能力的国家开始着手核设施退役，退役风险也会增加。丰富的核设施退役经验有助于改善技术和降低成本。然而，只有对加速退役过程中的核反应堆进行认真管理和适当监管，才不会草率地做出核设施退役的决定或导致核反应堆实施退役工作前被长时间闲置情况发生。后者，一旦疏于监控和管理，会可能导致放射性

污染物泄漏、污染环境，并大大提高周围居民受辐射的风险（IAEA 2007）。

更好的核设施拆除法

核设施拆除的关键是要将放射性材料和非放射性材料分开。这样一来，用于对放射性材料进行特殊处理的废料量减少了，最大化了可回收材料的数量，如钢铁和铝。同时，可用于拆除现场的混凝土碎石也得到充分利用(Dounreay 2012)。一些需要被拆除的材料也可以就地清除污染。错综复杂的核设施拆除工作需要在拆除进行前熟知核设施的辐射特性及状态，包括它们的运作历史，例如曾经发生的意外和事故，以及乏燃料是否有残余。

一些受到核污染的材料必须要单独拆除或在进行最后分离，其中有些设施当初建立的目的是为了为了保护反应堆运行过程中工作人员，而这些设施的拆除工作更难进行。比如，在核反应装置中，高放射性的液体物质一般由钢管输送，这些钢管

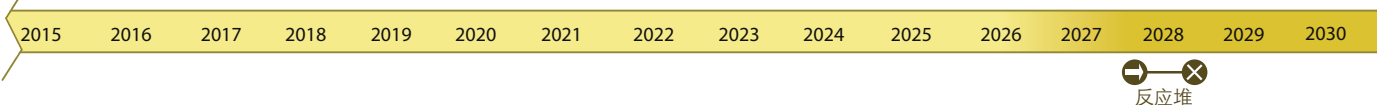


图5：西班牙范德洛斯一民用核能反应堆的退役拆除工作主要分三个阶段完成：关闭核反应堆和前期工作（1991—1997）；拆除反应堆以外的结构（1998—2003）；拆除反应堆压力容器（2028年前后）。第三阶段预计在反应堆贮存25年后再进行，但这期间反应堆仍会受到密切监控。

来源：ENRESA（2009）



专栏3：核反应堆退役产生的放射性物质

核反应堆退役过程中所产生的放射性废弃物大部分为放射性极低或较低的废弃物，主要是钢材和混凝土。反应堆的组件是主要的高放射性废弃物，这些废弃物的同位素在衰变过程中不断释放辐射。由于一些同位素的半衰期相对较短，其初期放射性衰减较快。但50年后，大多数放射性废料的辐射性与初期的辐射性相比会大幅降低。

同位素	半衰期（年）
C-14	5 730
Ni-59	75 000
Ni-63	96
Fe-55	2.7

正如切尔诺贝利核电站事故中带给我们的惨痛教训，高剂量的辐射会引发辐射病、癌症甚至可能导致近期死亡或急性猝死。而低剂量辐射也可能导致癌症和基因损伤。但是，在正常的核反应堆操作及核设施退役过程中受到的辐射，对工人的影响却是微乎其微的。

核设施退役和处置中产生的辐射主要是β和γ射线（图7）。这两种射线也是威胁的主要来源。由于核设施退役过程中产生的废料一般都是固体形态，只有意外泄露的放射性尘埃可能会危及大众。（US EPA 2011b）

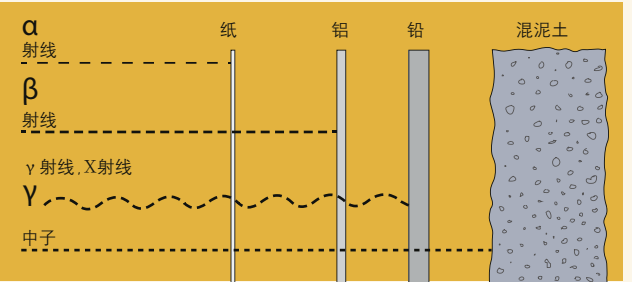


图7：α、β、γ射线以及中子射线穿透材料的能力各不相同，α粒子穿透力弱，一张纸就可挡住，而β粒子能被薄铝板挡住，γ射线却只能被像铅这样的重金属阻挡，而中子辐射则需要混凝土或水体阻挡。来源：WNA（2011 c）

外层通常由混凝土包裹，包裹在混凝土中的管道一般具有较高的放射性，而混凝土自身放射性较低或没有放射性，因此使退役变得更为复杂。被污染的物质要么逐个被清除，要么之后被隔离（O’ Sullivan等人 2010）。

减少核污染废料的核心在于核设施退役过程中需尽可能精确地分离受到污染的部分。但这与最大限度减少工作人员受照量是矛盾的。因此，在退役工作展开前要进行评估，在应用手工操作还是遥控技术两者之间做出合适的选择。很多案例使用遥控装置、机械臂、机器人等将废弃材料切削成小块。此类技术极有发展空间，将来在核设施退役中，可以选择性地进行切削分离，从而减少放射性废料，并降低成本和辐射风险。

从首批核反应堆退役工作中得出的经验是，如果当初设计反应堆时考虑到了未来的退役工作，退役工作将更容易开展并且更节省成本。（OECD/NEA 2010a）。以往的核反应堆中，只有极少数的一体化设计能够较为方便地完成退役。现今的核电站通常都预设了核设施退役计划。事实上，当初申请核设施建设时，就需设计初步的核设施退役方案（OECD/NEA 2010a）。另外，退役方案还应定期更新，至少在计划关停核反应堆提前两年拟定详细的退役计划。（IAEA 2008 2011b）。然而，仍有一些反应堆由于政策改变、事故或者



可压缩的低放射性废弃物包括，受到放射性污染的衣物、玻璃以及建筑材料。来源：（Sellafield公司）



图为装有中等辐射强度废液的桶纵切面，在混凝土的长期包被下，桶中的废液已经固化。中等辐射强度的废料都是一些高污染材料，诸如燃料棒外壳或退役的反应堆压力容器等。这些废料的保存处理需要采取辐射屏蔽措施。废料存储时间取决于其中放射性同位素种类。放射性废液在处置前一般需要固化。来源：Dounreay

自然灾害等原因不得不提早关闭（专栏4）。

资源和能力

一些国家已经在开发专门针对核设施退役的技术。例如在美国，已有1450座不同类型的核设施完全退役，包括核反应堆（US DOE 2012）。在一些国家，这种专业化技术水平已很高，但大多数国家在这方面的技术还有待提高，相应的基础设施也需改善。很多国家的高校和科技部门都在进行培训，或着手开发研究核设施退役技术。主要聚焦在自动化技术和放射性环境改进的工作方法。

未来民用核反应堆的退役工作将与军用核反应堆、科研型反应堆及其他核设施的退役竞争技术、资源及处理设施。目前世界上有或大或小300多座核反应堆，均已停止运行（WNA 2011a），但是大多数还未进行退役工作。

公众接受度

公众接受度决定着核能的发展前景（OECD/NEA 2010）。核电站是应立即拆除还是延缓拆除，怎样处置放射性废物，是留在未开垦区，还是采取封固埋藏法或其他方法，都取决于公众接受度以及技术层面的考虑。彻底的退役行动可能会引起附近居民不满，但这却可以避免土壤污染。封固埋藏法，

专栏4：受损核反应堆的管理

核设施退役需进行安全评估，且由监管机构审核通过，同时还要进行环境影响评价（EIA），完成环境影响报告书（EIS）。像三里岛（美国）、切尔诺贝利（乌克兰）、福岛（日本）这样发生重大事故的核设施退役方式，与其他使用期满停止运行的核设施的退役方式是完全不同的。它需要不同的计划、设备及更多的资金。受损的反应堆可能会发生核燃料泄露，并且其安全壳也可能受损。核反应堆及相关设施在退役或固封前必须先保证其稳定性和安全性。

1979年，三里岛第2组核反应堆堆芯因过热而部分熔化。操作人员随即对现场进行清理，并移除核燃料，净化放射性废水，将放射性废物运送至处置场。堆芯熔化剩下的核燃料及残骸则被送往政府机构，贮存在干燥的环境中，但还未决定其最终的处置地。在1号核反应堆关闭之前，2号反应堆会一直被“监控储藏”。最终，两个核反应堆均会退役（US NRC 2009）。

1986年切尔诺贝利4号核反应堆爆炸并燃烧，向空中释放了大量的放射性物质。爆炸导致的火灾几小时后就被熄灭了，但是核反应堆里的石墨却燃烧了数日。政府花了半年时间将4号机组用混凝土掩体，并进行了封闭。但这并不是固封的最后环节，该掩体已经出现损坏，水可渗入其中，极有可能导致崩塌。目前，计划于2015年底在掩体外新增安全壳，来防止结构腐蚀，而且其内部核燃料和废料也将被安全地转移到新的废物存储地（Wood 2007, Yanukovych 2011）。

2011年12月，东京电力公司（tepcO）、日本经济产业省、国家能源与资源厅和日本核能与工业安全局首次宣布了福岛核电站退役计划。计划利用10年时间移除贮存池中的核燃料，10年后着手移除堆芯燃料。这是非常复杂而艰巨的任务，因为堆芯的损坏程度无人知晓。据推测，反应堆的一个堆芯已经熔穿反应堆压力容器并且已经进入到反应堆底部的土中。移除堆芯需要10-15年的时间。反应堆结构的最终退役完成则需要30-40年（WNN 2011b）。





临时封装和储存的放射性废物。来源：Nuclear Decommissioning Authority英国

不仅表面上缺乏吸引力，并且只是将反应堆维持在安全模式，所以还需要长久的安全管理（OECD/NEA 2010b）。

一些管理者担心公众争议，而另一些则对此持欢迎态度，例如，英国核设施退役局近年来更重视以公开途径解决核设施退役的相关问题（UK DTI, 2002）。加大信息的透明度能够取得显著的效果。负责运营俄亥俄州普拉姆布鲁克研究反应堆的美国国家航空航天局（NASA）制定了一系列计划，通过社区工作间、网站、视频，开展反应堆媒介参观、核电站开放日等活动，来呼吁公众对核设施退役的关注。这样，富有争议的核设施退役问题最终很有可能获得当地民众的支持（IAEA 2009）。2000年，政府间核能机构设立了利益相关者信心论坛。这有利于从社会层面交流放射性废物管理经验。其主要内容是寻找与公众保持建设性对话的方法，以便增强公众对决策过程的信任，而国家、地区、地方级的参与者也都有可能加入决策过程中来（OECD/NEA 2011）。

核设施退役中的不可预测性

在福岛事故发生后，各国都重新评估了其核能计划，这也将影响国家的核设施退役计划。评估的内容包括：是否已具备必需的科学技术、专业理论知识、资金以及完善的基础设施来应对可能发生的意外事件或提前退役。

在本文撰写之时，日本剩下的50个核反应堆中，仅有5个仍

在运行（IAEA 2012a, WNN 2012a）。如果反应堆通过压力测试，抵御海啸防护措施也已到位，并且获得政府和地方当局的同意，这些反应堆即可重新启用。日本政府在2011年临时决定关闭滨冈核电站，是因为担心未来此地区会发生地震。在未找到更有效的防御海啸措施之前，滨冈核电站不会重新启用。（WNN 2011d）

德国决定到2022年逐步关闭所有的核电站，这也就意味着目前正在运营的13个核电站将被提前关闭（WNA 2011d）。提前关停这些核电站需要巨额的花费来对退役后产生的大量废物进行安全处理，而且一旦延期退役，还需对大量的封存设施进行安全维护。因而德国急需核设施退役方面的专业技术和相应的基础设施建设。

任何国家都应做好应对核设施退役过程中可能出现事故的应急准备。比如，核设施退役的开始和停止阶段都应该有立法人员、监管人员和律师等的参与。2010年，美国佛蒙特州的扬基核电站，因存在放射性氙气泄漏的隐患，加上操作人员的言论误导，州政府决定吊销了该核电站的运营执照。扬基核电站本应于2012年3月关停，但核电站管理方通过合法途径阻止州政府将其关闭（WNN 2011d, 2012b）。

核设施退役的成本及筹资

核反应堆退役的成本很大程度上取决于反应堆的类型、尺寸、位置、距废弃物处理设施的距离及其可用性的情况，核电站旧址的未来用途以及在退役过程中反应堆和核站的状况。目前已设计完成对退役成本估算方法（OECD/NEA 2010c）。然而，对于目前记录在案的为数不多已完成退役的核电站，其退役费用却很少（OECD/NEA 2010c, US GAO 2010）

在整个核反应堆运行费用中，反应堆的退役费用占很大比例（图8）。此图还显示了，在过去的40年中，从民用核反应堆得到的收益只占很小的比重。在美国，核反应堆退役的平均花费约5亿美元，约是初始投资成本的10%-15%。在法国，小型的布雷尼力反应堆退役（运营时间：1967年-1985年）估计需要59%的初始投资成本。

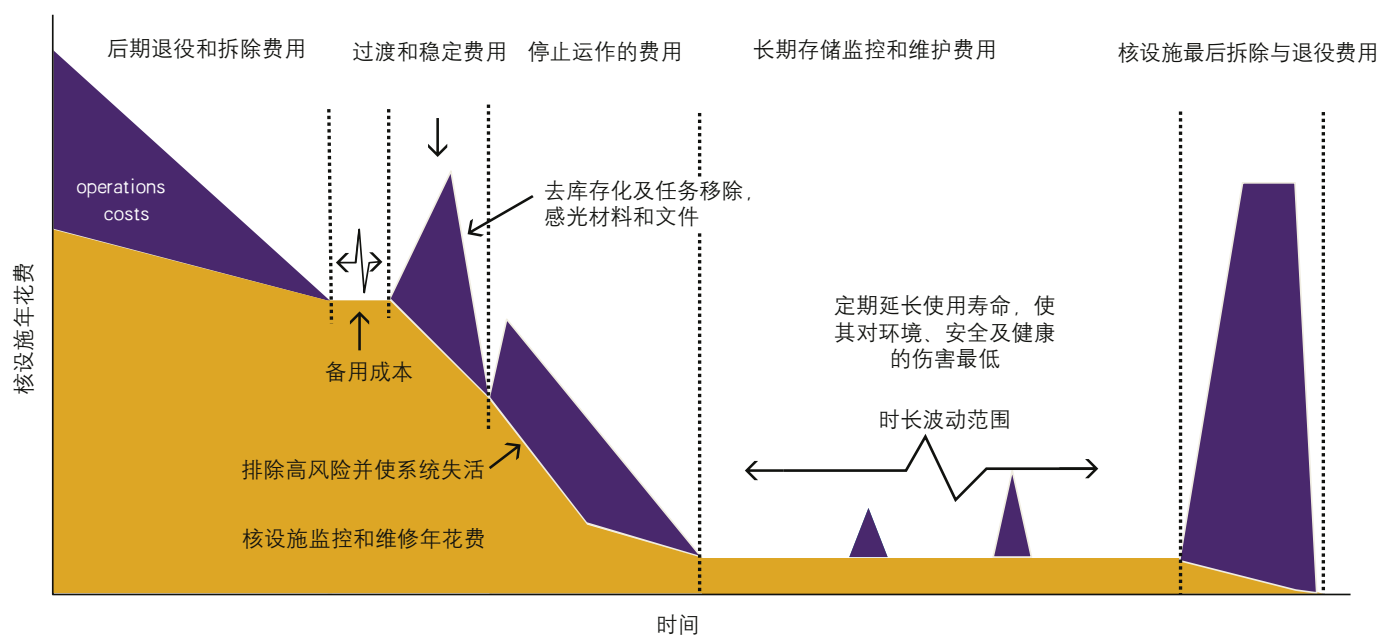


图8：核电站退役需要很多年，且成本相差很多。最大的投资是在开始关闭核设施和最后拆除的过程，而封存期的投资不高。以上这些因素都可能会影响退役过程所需时间。

但该成本在2001年到2008年内增长了26%，大约50亿欧元，是原来预算的20倍（Cour des comptes 2005,2012）。英国核设施退役的政府财政拨款从1970年的200万英镑增长至1990年的95亿英镑再到2011年的537亿英镑(Huhne 2011)。这说明，核设施的退役成本可能远远超过原有的预算（OECD/NEA 2010d）。随着核设施退役经验的丰富，这种不确定性情况和花费都将会有所减少。

在很多国家，本着“谁污染谁治理”的原则，核设施的退役费用是由运营者筹集（Deloitte 2006, Wuppertal 2007）。然而，政府应负责确保本国运营的核电站能够筹集到充足的资金来满足核电站的正常安全运行以及一旦发生意外后所需花费的巨额费用。多大的资金额度可以抵御金融危机是不确定的，投入资金也未必能得到预期回报。但无论怎样，政府都有可能是最后的出资方（SwissInfo 2011）。

2006年欧盟委员会发布了关于核设施退役、乏燃料及放射性废物处置的财政资源管理建议和指导方针（EU 2006a,b）。

另外，近期欧盟指出，将为乏燃料和放射性废物的责任管理和安全管理建立一个共同框架体系，所有的成员国都必须确保核设施退役的资金渠道通畅（EU 2011）。大部分欧洲各国政府确保了资金来源，不过融资体制各有不同。比如说，

专栏5：全球核设施退役管理规则

“乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约”是第一个从全球层面出发，直接针对核设施退役中产生的放射性废物进行管理的法律文件（IAEA 2011）。联合公约于2001年6月18日生效，目前已在62个国家通过。公约的第26条规定每一缔约方应采取适当措施，以确保核设施退役的安全。这些措施应确保 (i) 配备合格的人员和足够的财力；(ii) 实施第24条中关于运行辐射防护、排放及无计划或非受控释放的规定；(iii) 实施第25条中关于应急准备的规定；和 (iv) 关于进行核设施退役中重要资料的保存



表1 放射性废物分类 来源：IAEA (2009b)

	极低放射性废物 (VLLW)	低放射性废物 (LLW)	中放射性废物 (ILW)	高放射性废物 (HLW)
放射性	包含极少量长寿命放射性同位素，且放射性浓度通常高于清洁解控水平	包含少量长寿命放射性同位素，具有较高的放射性	包含长寿命放射性同位素，通过近地表处置，其放射性浓度无法衰减到可接受水平	放射性浓度很高，衰变产生大量的热，或者长寿命放射性同位素含量很高
废物来源列举	混凝土废墟,土壤	衣物、玻璃、建筑材料	燃料棒外壳,反应堆容器部分	乏燃料残骸
隔离位置	垃圾填埋场表面	30米深的近地表处置区	几十至几百米浅地层处置区	深层地质构造区
是否要屏蔽	否	否	是	是
是否要冷却	否	否	否	是

西班牙是由上市公司负责筹集资金，而在斯洛伐克是由经济部负责。从全球整体层面来看,《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》解决了核设施退役所需的资源问题。

核设施退役带来的威胁

核设施退役时释放大量放射性物质的风险低于运行期。一旦核燃料被移除，也就消除了大部分放射性。当贮水池和管道设施被排空时，剩余的大部分放射性物质呈固态，更易于处理，且极少有进入环境的可能。然而，核设施退役的工作是非常规性的,需要手动处理,因此工人受到辐射的危险性也更高。

放射性废弃物的种类和数量

反应堆运行过程中，会产生同位素，同位素衰变即会释放具有潜在危害的辐射。这些物质的半衰期（放射性衰减至一半所需时间）从几秒到几百万年不等。半衰期大于十天的物质都可能成为放射性废物。放射性废物在其放射性衰减到可接受水平之前必须安全贮存。我们通常根据废物的危险性和衰减期将其分类（极低放射性废物，低放射性废物，中放射性废物，高放射性废物），以便储存和处置（表一）。

大多数高放射性材料通常是来自核反应堆的乏燃料，即为最

终产生的高放射性废物。一座典型的1000兆瓦反应堆每年大约产生27吨此类废物（WNA 2011e）。每年世界核反应堆所产生的乏燃料量仅仅可以填满两个奥林匹克游泳池。尽管数量相对较少，但其放射性占核电行业放射性废物总放射性的95%。这些高放射性废弃物需要隔离几千年。

根据目前的废物管理实践,高放射性废物最终需要经深埋处置。尽管一些国家,包括芬兰、法国和瑞典,已选定了地点,然而还没有国家具备有可操作性的设施来处置高放射性废物。



对低放射性废弃物的典型处理方法是将其埋在地下。但应防止放射性同位素随水流被带出深埋区。图片来源：US NRC

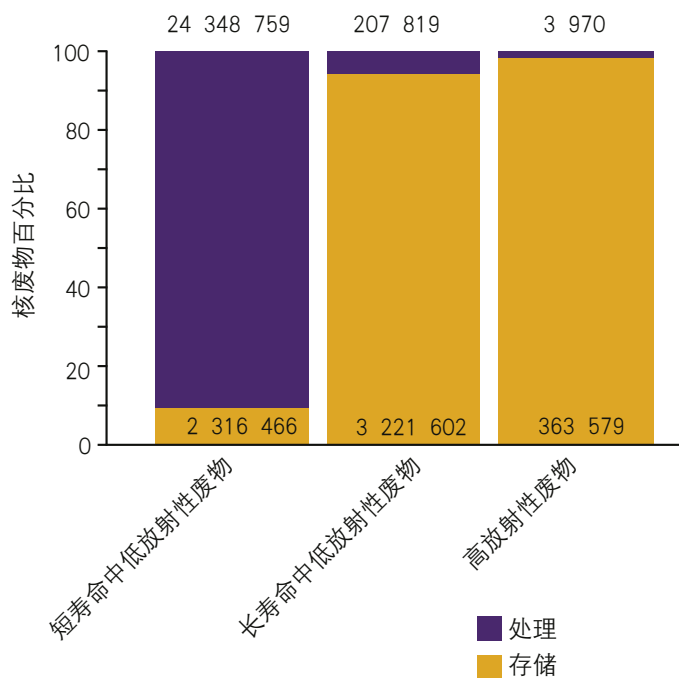


图9：退役的核燃料所产生的废物，可以分为低放射性废弃物，中等放射性废弃物和高放射性废弃物。此图显示了不同类别废弃物存储量和处理量的比例。计算单位为立方米，图表中数据根据1994国际原子能机构废物分类的旧数据。根据此分类，低放射性废物和中等放射性废物被合并成两个子分类：短寿命和长寿命废弃物。极低放射性废弃物没有被作为一个单独的类别列出。资料来源：（IAEA汇编2011 d）

一方面是由于成本问题及公众对所选地点的反对（WNA 2011 f），另一部分原因是乏燃料和其他高放射性废物冷却时间不足而导致无法被永久封存。在最终关停核设施的最初20到30年，退役核燃料的部分内部物质属于高放射性废弃物。

乏燃料被移除后，退役过程中只产生少量的高放射性废物（HLW），其中大多数是反应堆移除后遗留的核燃料残骸。然而，核设施退役通常会产生三分之二的低放射性或中低放射性废物，这些废物来自于反应堆运行期间（VLLW, LLW和ILW）。

拆除一个1000兆瓦的反应堆大约产生10000立方米的极低放射性废物、低放射性废物及中放射性废物，但是通过适当的管理，使用机器人选择性地高放射性物质筛选出来，这个数目将会大大降低（McCombie 2010）。这些废物包括

大量建筑材料，以及核反应堆压力容器钢、化学污泥、控制棒，和其他类似核燃料的材料。几十年后，其放射性即可以忽略不计。但在这之前这些废弃物需要进行安全处理、存储和处置。

截至目前，退役时产生的长寿命中低放射性废物，只有7%进行了处理（图9），剩下的93%仍处于存储状态以待安全处置。许多国家已经建立了放射性废物管理机构，但是这些机构要具备处理未来核设施退役可能产生的大量废弃物的能力，还有很长的路要走（CoRWM 2006）。有些生产核能的国家已经建立了处理极低放射性废弃物的设施。

潜在的辐射暴露途径

退役过程中，如设备的切割，有可能使放射性尘埃和气体扩散（Shimada等2010）（图10）。而这种空气辐射是工作人员面临的主要风险。通过过滤器的除尘作用，这些空气中的放射物能够很好地抑制或安全转移。高污染的反应堆组件有时可以在水中切割，这给工作人员提供了安全保障，同时也能避免放射性物质释放到空气中。如果存储设备遭受腐蚀或

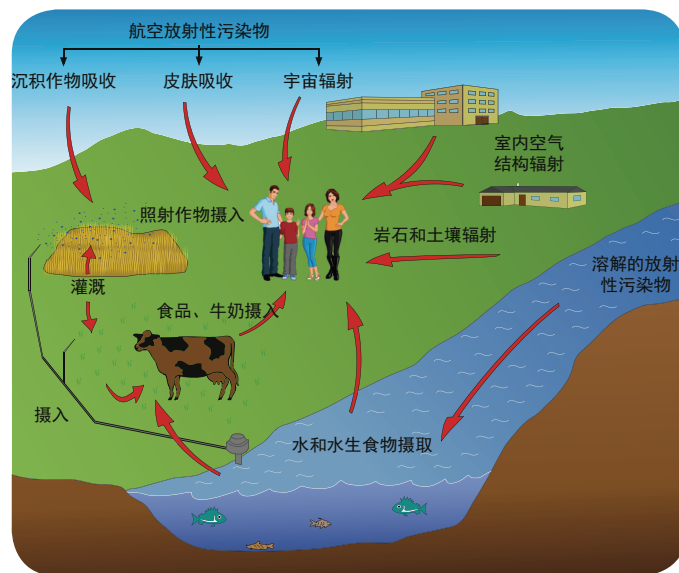


图10：辐射暴露途径。在核设施退役中，如发生事故，空气中的尘埃可能具有放射性并发出辐射。资料来源：Arizona State University汇编2011

