

核动力厂放射性废物的管理

中低放废物的类型及如何处理综述

V. M. Efremkov

在许多国家里，核动力厂是本国能源体系的重要组成部分。与用于发电的大多数能源形式相比，核能是一种经济上有竞争力、环境污染较小的能源。核能与其它能源一起利用，有助于保证这些国家的电力供应。看来可以肯定地说，在中期及中期以后，如果要想保持世界上工业化国家的生活水准和满足发展中国家的能源需求，那就仍然有必要使核能对各国的能源供应作出越来越大的贡献。

核反应堆的运行，会产生一些放射性废物。但与燃煤电厂产生的废物相比，此类废物的数量很小。（见附表。）核动力厂产生的废物，其放射性活度相当低，其中包含的放射性核素的放射毒性较低，半衰期通常也较短。然而，核动力厂是各类核设施中数量最多的一种，产生的放射性废物量也最大。

核动力厂产生的废物的性质和总量，取决于反应堆的类型、具体的设计特点、运行条件和燃料的完好程度。这些放射性废物含有结构材料、慢化剂和冷却剂被活化后产生的放射性核素，还有腐蚀产物以及由燃料的破损引起的裂变产物污染物。核动力厂废物的处理和形态调整用的方法，现已达到高度有效和可靠的程度，但还在进一步改进，以便提高整个废物管理体系的安全性和经济性。

核动力厂产生的废物

核动力厂的中低放废物（LILW），是各种材料受到反应堆内的裂变和活化产生的放射性核素，或燃

料或包壳表面释放的放射性核素的污染而产生的。这些放射性核素主要是在反应堆冷却剂系统内释放和聚集的，在乏燃料贮存池内也释放和聚集，但量要小些。

核动力厂运行期间产生的废物，主要是换料或维修期间拆下的部件（主要是活化了了的固体，如含钴-60和镍-63的不锈钢），或生产性废物（如受液态冷却剂回路内裂变产物污染的各种液体、过滤材料和离子交换树脂等）。

为了减少需要临时贮存的放射性废物量和使处置费用尽量小，各国正在或打算采取措施，尽可能地减少已产生废物的体积。减容对低放废物来说是特别使人感兴趣的，因为它们通常是体积很大但放射性活度较低的废物。使用一些行政管理性的措施，例如用热风干燥器代替擦手纸、使用可复用的耐用防护服等，以及通过普遍改善操作工具或搞好“内务”，可以明显减少废物量。

液体废物和湿的固体废物

目前正在世界各地进行商业运行的反应堆类型是不同的，它们产生的放射性废物流也不同。这些废物流在放射性含量和所产生的液体废物量两方面都不相同。水冷却和慢化的反应堆产生的液体废物，多于气体冷却反应堆产生的液体废物。沸水堆（BWR）产生的液体废物量大大地多于压水堆（PWR）的液体废物量。由于重水堆（HWR）的净化系统主要采用能使重水返回利用的一次通过式离子交换技术，所以重水堆实际上不产生浓缩的液体废物。

一回路冷却剂（PWR、BWR）的净化，以及乏

Efremkov 先生是核燃料循环和废物管理处高级职员。

燃料贮存池、排水设施、洗涤水和泄流水的净化，能产生放射性液体废物。反应堆的去污操作（例如工厂管道和设备的维护活动）也产生液体废物。去污废物可能包括污物（腐蚀产物）和各种各样的有机物（如草酸和柠檬酸）。

湿的固体废物是核动力厂产生的另一类废物。它们包括不同种类的废离子交换树脂、过滤材料和淤渣。废树脂占动力堆产生的湿固体废物的绝大部分。深脱盐装置使用颗粒树脂，这类树脂在核动力厂中用得普遍。PWR 很少使用粉状树脂，但使用预涂层型过滤脱盐装置的 BWR 通常采用粉状树脂。在许多 BWR 中，粉状树脂废物的主要来源是“凝结抛光剂”，这种抛光剂是对液体废物蒸发后产生的凝结水进行附加净化时使用的。

核动力厂用来处理液体废物的预涂层型过滤器，产生另一类湿的固体废物，即废过滤器的淤渣。过滤器的助滤剂——通常是硅藻土和纤维素纤维——和从液体废物中除去的污物，一起形成过滤淤渣。某些过滤系统不需要助滤剂材料，因而此类装置中产生的淤渣不含有别的物质。

液体或固体废物的处理和形态调整

核动力厂产生的放射性液体废物，一般含有可溶和不可溶的放射性组分（裂变产物和腐蚀产物）以及非放射性物质。各种废物处理方法的总目的，是将液体废物去污到这样的程度，即去污后的大量水相废

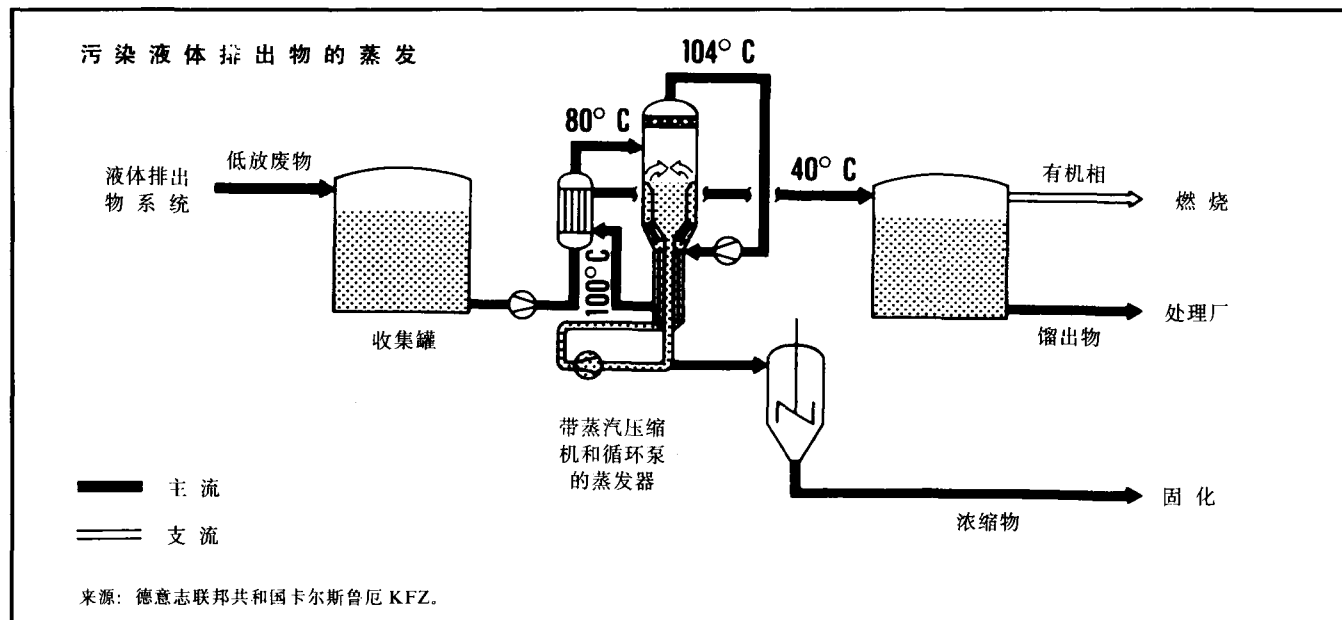
物可排入环境或重新使用。废的浓缩物要进一步进行形态调整、贮存和处置。因为核动力厂产生的液体废物几乎涉及所有种类，因而要用到几乎所有能处理放射性废液的方法。人们通常采用标准的工艺技术来除去液体废物流中的污染物。每一流程对液体废物中所含的放射性物质产生特定的影响。究竟要用多少个流程组合起来使用，取决于污染物的总量及其来源。用来处理液体废物的工艺流程主要有如下四种：蒸发，化学沉淀/絮凝，固相分离和离子交换。

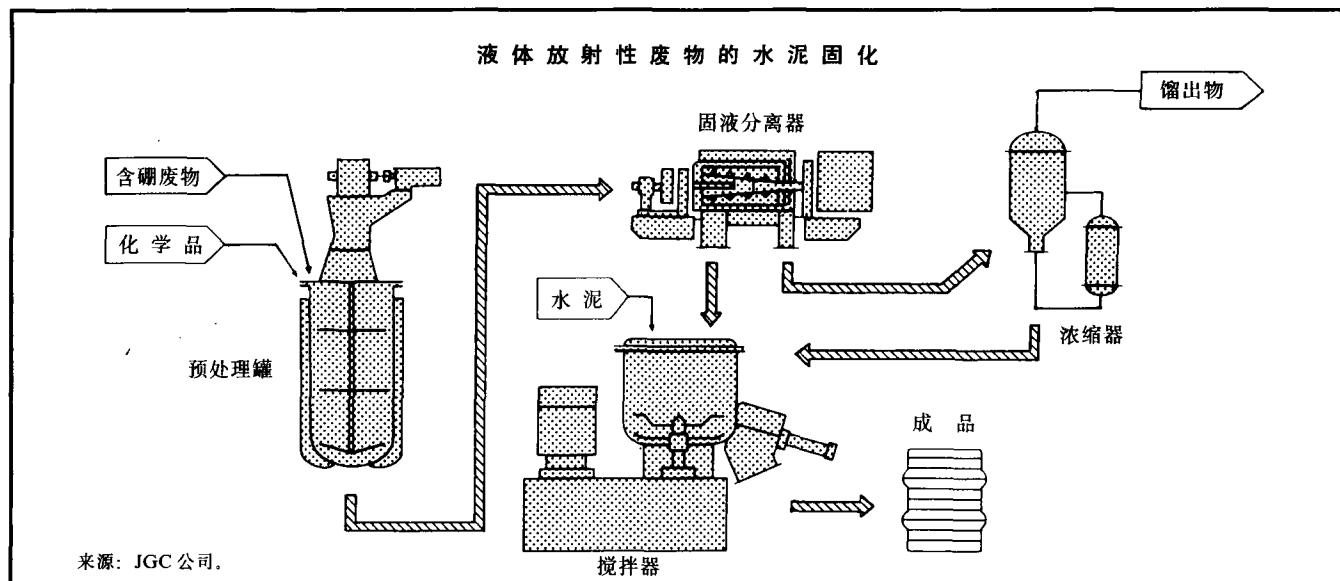
这些处理工艺已经相当成熟，并已得到广泛应用。不过，许多国家正在根据新的工艺技术致力于提高安全性和经济性。

与其它的工艺技术相比，蒸发的减容效果最好。去污程度取决于液体排出物的组成和蒸发器的类型，已达到的去污因子在 10^4 — 10^6 之间。

蒸发是处理液体放射性废物的一种成熟的方法，它不但去污效果好而且减容明显。水以这一过程的汽相形式除去，留下的是非挥发性组分，如含有大部分放射性核素的各种盐。对化学组成很不均匀且盐含量较高的废物来说，蒸发也许是一种最好的工艺技术。（见附图。）

尽管人们可以认为蒸发是一种相当简单的操作，而且在传统的化学工业中已成功应用了多年，但是用它处理放射性废物可能会出现一些问题，如腐蚀、结垢或起泡沫。这些问题可采取适当的措施来减轻。例如，调整 pH 值以减少腐蚀；除去有机物以减少起泡沫，或者添加防沫剂；用硝酸清洗蒸发器系统以清除





结垢, 随后钝化结构材料。

到目前为止, 低放排出物的蒸发减容的效果一直很好, 以致可以把干净的凝结水无需进一步处理就排入环境。

以凝结-絮凝分离原理为基础的化学沉淀法, 在核动力厂中主要用于处理低活度、高盐高泥浆含量的液体排出物。它们的效果主要取决于液体废物的化学和放射化学组成。用氢氧化物、碳酸盐、磷酸盐和亚铁氰化物之类的不溶性化合物, 可将大多数放射性核素沉淀、共沉淀和吸收掉, 从而将它们从溶液中除去。沉淀物还可以通过物理夹带作用把溶液中的悬浮粒子带走。然而, 由于种种原因, 从来不可能达到完全的分, 因而所达到的去污因子是比较低的。为此, 人们通常把化学处理法与其它比较有效的方法结合起来使用。

进行固相分离的目的, 是从液体废物中除去悬浮的和沉降下来的固体物质。在市场上可买到几种类型的分离设备, 它们都是以各行各业常规的水和废液处理厂中经常使用的分离设备为基础的。最普及的分离设备是过滤器、离心机和水力旋流分离器。粒子分离是一种非常成熟的技术, 几乎所有的核设施都采用机械设备将悬浮固体从液体废物流中分离出来。通常, 当液体废物中存在着有可能妨碍后面处理过程(如离子交换)的粒子, 或妨碍水的再利用时, 就需要用分离设备除去这些粒子。

典型的过滤器可以除去直径小到比 1 微米还小一些的粒子, 采用预涂层过滤器时更是如此。过滤器用完以后, 或者对其进行“反洗”, 产生含有大约 20—

40% 固体的淤渣, 或者是在使用过滤芯的情况下更换整个过滤芯。

离子交换法已广泛地用于处理核动力厂的液体排出物。应用实例包括水堆中一、二回路冷却剂的净化, 燃料贮存池水的处理和蒸发产生的凝结水的二级净化。

放射性液体废物通常必须满足如下标准才适宜于进行离子交换处理: 废液中悬浮固体的含量比较低; 废液中总的盐含量比较低(通常小于 1 克/升); 以及放射性核素以合适的离子形式存在。(为了除去胶体物质, 可以采用用粉状树脂作过预涂层处理的过滤器)。

在大多数工艺系统中, 离子交换工艺的实际做法是使用固定床离子交换柱, 污染废液自上而下或自下而上流过这个交换柱。离子交换材料的活性区段达到饱和(穿透容量)以后可以被再生。某些类型的离子交换剂也要作为废浓缩物被取出, 然后进行固化。因此, 离子交换工艺是一种半连续性的工艺, 冲洗、再生、漂洗和换料等维护保养性的操作要花费大量的精力。

废液处理过程产生的湿固体, 还必须转变成固态制品, 以便最终处置。固定化的过程主要是将废物转化成化学上和物理上稳定的形式, 以便减少在贮存、运输和处置期间可能出现的各种过程引起放射性核素迁移或弥散的可能性。只要可能, 调整废物的形态时也应做到减容。

调整湿固体废物形态时最常用的方法, 是水泥固化、沥青固化, 或者掺入聚合物中。许多国家多年

来一直广泛地采用水泥将放射性废物固化。(见附图。)水泥具有许多优点,最显著的优点是成本低和使用的工艺设备比较简单。水泥的密度较高,这就使这种废物形体具有很强的自屏蔽能力,因此降低了在货包外面附加屏蔽的要求。在某些情况下,为了使产品达到可接受的质量,也许要进行化学或物理的预处理。有时,也可以使用其他的可替换材料,如已粉碎的燃料灰和高炉矿渣。它们的性能与普通水泥相似。

各国多年来还一直在使用沥青固化技术固化湿固体废物。沥青固化是一种热作工艺,能把湿废物流先进行干燥,然后再进行固定化和装桶。这种方法能使经形态调整后需要处置的废物体积大大减小,从而节省费用。不过,沥青是一种潜在的易燃物质,要特别注意防止它被意外引燃。尽管如此,沥青固化法已经被越来越多的废物生产者所接受,在美国、日本、瑞典、苏联、瑞士和其他一些国家的核动力厂中,都采用这种方法对放射性废物进行形态调整。

与水泥或沥青固化相比较,将湿固体废物掺入塑料或聚合物中的做法是一种比较新的固化工艺。聚酯树脂、乙烯酯树脂或环氧树脂之类的聚合物,通常只限于在技术上不适宜使用水泥或沥青固化的那些场合下使用。此类聚合物十分昂贵,需要在比较复杂的车间中进行操作。聚合物的优点是防止放射性核素泄漏的能力强,而且它在化学上通常是惰性的。

最近,人们对采用移动式装置调整核动力厂放射性废物形态的兴趣越来越大。这主要是可以节省一笔基建费用,因为许多地方的废物生成量往往不大。例如在美国、德意志联邦共和国和法国,都有一些能调整核动力厂放射性废物形态的移动式固化装置在使用着。尽管已研制成若干种利用聚合物的设计,但是这些国家中的大多数还是采用水泥固化工艺。

气体废物和放射性气溶胶

在核动力厂的正常运行中,产生某些气载放射性废物,它们有的以微粒形式出现,有的以气体形式的气溶胶出现。微粒式放射性气溶胶,能够以液体或固体的形式产生(颗粒的大小可以在很大的范围内变化),也可能与非放射性气溶胶一起产生。气溶胶有三个主要来源:活化了了的腐蚀产物和裂变产物的逸出,气体的放射性衰变生成非挥发性元素,以及裂变过程中形成的挥发性放射性核素吸附在已有的悬浮物质上。

最重要的挥发性放射性核素有卤素、惰性气体、氚和碳-14,它们构成了核动力厂正常运行期间产生的气体放射性废物。各种气载废物流的放射性的组成和数量是不同的,主要取决于堆型和释放途径。

核动力厂的所有废气排出物都要先经过处理,除去其中的大多数放射性组分,然后才能排入大气。

废气处理

一切核动力厂中的传统做法是,污染气体和建筑物排出的空气,首先通过各种过滤器以除去微粒状放射性物质,然后通过烟囱排放到大气中去。通风和空气净化系统通常由粗糙的前置过滤器和高效的微粒空气过滤器(HEPA)组成。对于粒径为0.3毫米的粒子来说,这些系统典型的粒子去除效率达到99.9%以上。

核动力厂运行中产生的放射性碘,通常靠浸渍过的活性炭过滤器加上微粒过滤器来去除。浸渍的目的是为了能捕集气体排出物中的有机碘化合物。

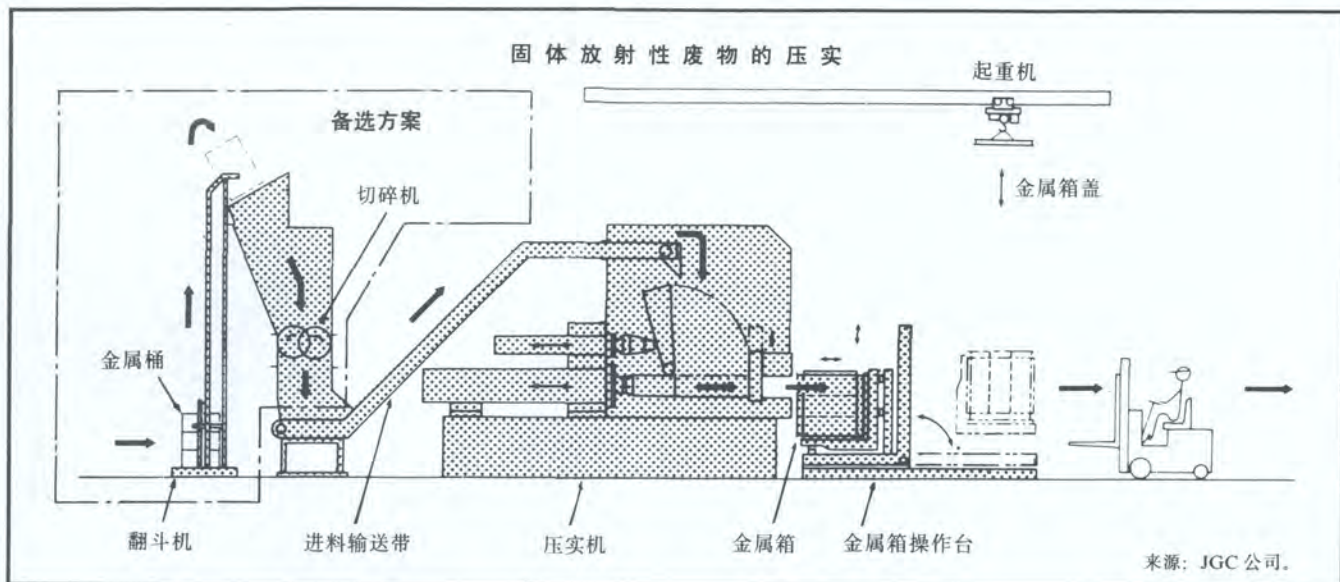
由于燃料元件释放的少量惰性放射性气体主要是短寿命的,因此延迟它们的释放,让放射性衰变,就可以大大减少最终排入大气的放射性量。用于这一目的的延迟技术有两种:用特制的罐把这些气体存起来,或让它们通过活性炭延迟床。

对延迟性的贮存来说,首先把惰性气体及其载气泵入气罐,然后将罐子密封好。贮存30—60天之后,把罐内的气体通过通风系统排放到大气中。如果不容许排放,贮存期可按需要延长。

延迟床由许多装有活性炭的容器组成,它相对地延缓载气因而延缓了惰性气体的通过,让放射性衰变起作用。

固体废物的处理和形态调整

在核动力厂运行期间,可产生各种含有放射性物质的干固体废物。这些固体废物的性质因设施而异,差别很大。可以包括反应堆车间中淘汰下来的物项、通风系统的过滤器、地面复盖物、污染的工具等等。另一个固体废物源是核动力厂的运行和维修期间使用过的各种各样的纸张、塑料、橡胶、抹布、工作服、小的金属和玻璃物品等。根据它们的物理性质和下一步的处理方法,通常将干固体废物分成如下四大类:可燃的、不可燃的、可压缩的和不可压缩的,并分



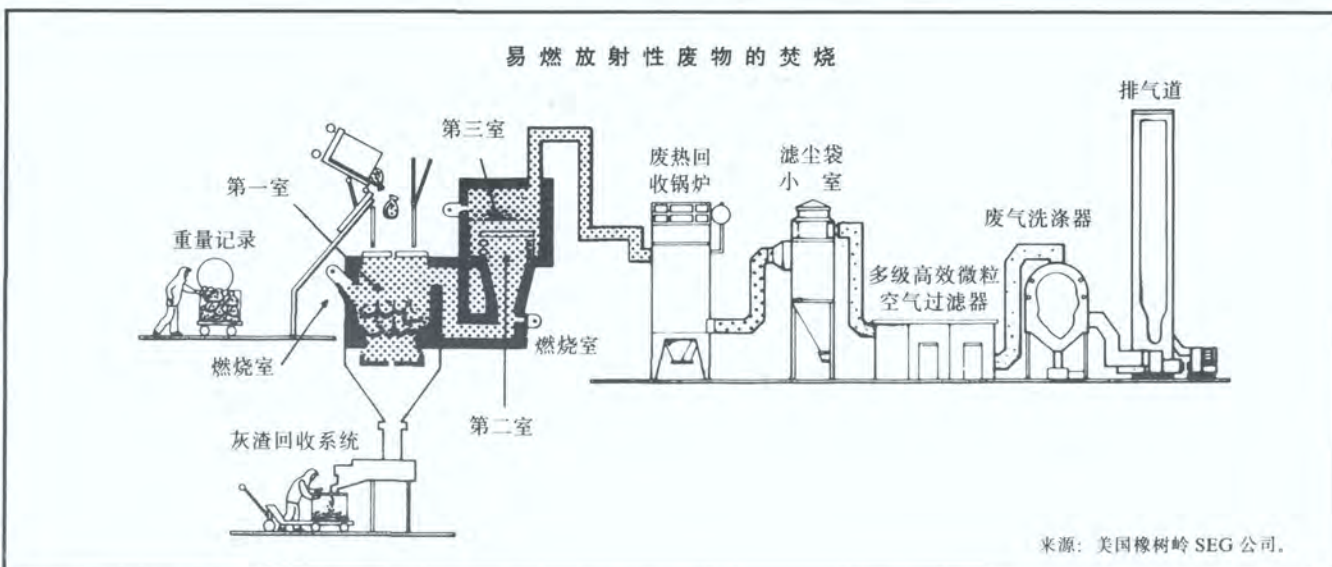
开存放。不过，每一设施通常都有其自己的、按照其主导工况建立的分类标准。

对固体废物进行处理的主要目的之一，是尽量减小需要进行贮存和处置的废物体积，最大限度地浓缩和固定废物中含有的放射性。

核动力厂放射性固体废物的材料和形态是五花八门的，没有一种技术能够恰到好处地处理好这种废物；通常要把几种处理技术结合起来使用。处理绝大部分固体废物所采用的基本而最常用的技术是以压实与基础的。这种方法虽然能在一定程度上减小贮存和处置方面的体积要求，但是从长期管理的观点来看，它在废物性质的改善方面几乎不起作用。

经验表明，核动力厂产生的放射性固体废物的 50—80% 可归入可燃废物这一类。这类废物的焚烧，从许多角度看，都会比简单的压实有重大的改进。可以实现大大的减容和减质。其最终产物是均匀的灰渣，它可以不加进一步的形态调整就装入容器进行贮存和处置。尽管焚烧仅适合于可燃废物，但它具有能够破坏有机液体（如各种油类、油脂或溶剂）的优点，不然的话，这些有机液体是很难处理的。（见附图。）

少量固体废物的焚烧，通常是在比较简单的设备内进行的。美国、日本、加拿大和其它一些国家的核动力厂，目前已都安装了这样的焚烧设备。在一些集



中的废物处理设施中，装备了比较先进的焚烧设备，可以焚烧比活度较高的废物。这样的设施可以接收来自国内外许多核动力厂的废物。瑞典、比利时、法国和其它一些国家都有这样的设施在运行。

切割、切碎和轧碎等手段，常被作为压缩或焚烧的预处理手段使用，以便减小单件废物的物理尺寸。纸张、塑料、布、纸板、木材和各种金属材料，可以切成小细条，而玻璃或混凝土块之类的易碎材料，可以轧成小碎片。这些技术也可以单独使用，使固体废物减容。

新发展

处理和调整中低放废物的工艺流程，目前大多已达到相当先进的工业规模。尽管这些工艺流程和技术足以有效地管理好核动力厂产生的放射性废物，但这一技术领域的进一步改进仍然是可能的和人们所希望的。日益增加的放射性废物处置费用，激发人们去采用能最大限度地减少废物量的操作步骤和技术，开发在处理形态调整阶段能最大限度地减小废物体积的新技术。要把成员国正在这一方面取得的所有新发展和新改进都在这里介绍出来是不可能的。

这些新发展的一些例子包括：采用特殊的无机吸着剂以改善液体废物的处理效果；采用薄膜技术处理液体废物；颗粒树脂与过滤浆液的脱水和干燥；废离子交换树脂的焚烧；防护服干洗以减少洗衣排水量；采用非常坚固的容器封装干燥了的过滤淤渣；玻璃固化某些中放废物以减小待处置废物的体积；以及不可燃废物的超压实。

也许这些新发展并不全都能在废物管理领域，尤其是在核动力厂中得到广泛应用。然而，这些研究和开发工作反映了这样一个事实，即核工业界和电力公司都特别关注核动力厂放射性废物的安全和管理，也反映了现有的工艺技术会有新的改进。



在法国马尔库尔玻璃固化工厂，固化后的高放废物容器被运送到带有通风的井筒中临时贮存。（来源：ANDRA）

