

可持续发展与电力生产： 废物处置影响的比较

国际原子能机构和其他组织正在评估用于比较
能源链产生的废物及其处置的方法

Roger Seitz

废物处置可能引起的健康和环境影响，是人类社会可持续发展所面临的一个日益令人担忧的问题。许多工业部门(采矿/采石、农业、制造业、电力生产、医疗等)都产生对人类健康和环境有潜在危害的废物。如果管理得当，这种废物对人类健康和环境将产生极小的危害。

然而，对环境的种种担忧源于这样的事实，即由于世界人口的增长、工业化和城市化，所产生的废物量日益增加(并预计会继续增加)。因此，制定可持续发展战略的一项艰巨任务，将是提供为维持经济增长和改善生活质量所必需的服务，同时在潜在危害和数量方面限制产生的废物及其健康和环境影响。

因为可持续发展将给日益增长的世界人口带来更好的生活条件，所以将需要使用更多能源尤其是电力。在开发出一种能满足对电力日益增长的需求的合适替代能源之前，未来电力需求的绝大部分将必须由煤、天然气、石油和铀/钍等常规燃料来满足。因此，可持续发展战略必须包括对基于上述燃料的整个能源链产生的废物的考虑。

本文简单介绍 IAEA 的一个旨在比较不同电力生产系统产生的废物和处置方法，

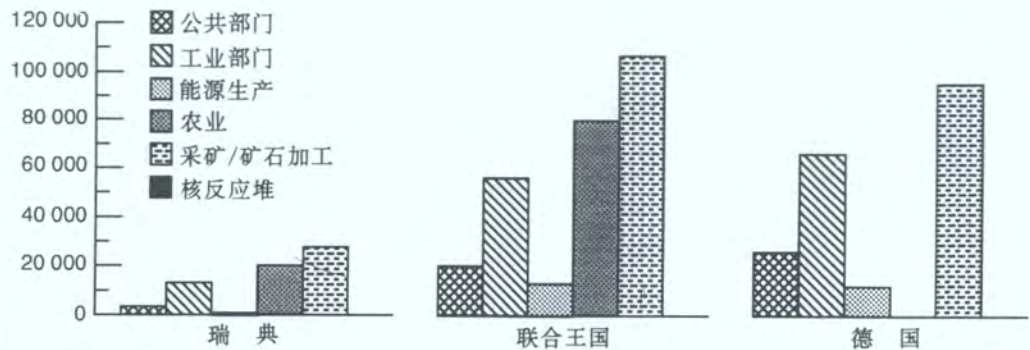
并审议用于评价和比较由于这种废物的处置造成的健康和环境影响的方法的项目初始阶段。重点是核动力在人类社会可持续发展战略中的作用。在这方面，本文强调与所有能源链和其他公共活动产生的总的废物量比较起来，核动力利用所产生的废物量是很少的。讨论电力生产能源链各个阶段产生的一些废物和它们各自的处置方法。(本文不涉及直接排放到空气和天然水体中的废气与废液。)本文重视对能源链所有阶段的考虑，由此获得有关通常被认为是“清洁”的电力生产系统产生的大量有长期潜在影响的废物方面的数据资料。本文还讨论多种非核废物中存在的放射性核素。

废物管理和可持续发展

经济合作与发展组织(OECD)估计，1990年其成员国产生的固体废物约为90亿吨。尽管近年来核工业和其他工业均实施了废物量最少化计划，但固体废物的总量仍继续增加。联合国环境规划署(UNEP)的评论认为，采矿/采石和农业(肥料、作物残余物等)部门产生的废物量最多。涵盖 OECD 国家的数据和来自联合国统计委员会与欧洲经济委员会(UNSC/ECE)的数据，都支持 UNEP 的基本结论。它们还认为，在有些国

Seitz 先生是 IAEA 辐射和废物安全处职员。本文全部参考资料可向作者索取。

三个国家的估计废物产生率



	瑞典*	联合王国*	德国**
公共部门	3 200	20 000	26 383
工业部门	13 000	56 000	67 203
能源生产	625	13 000	11 917
农业	21 000	80 000	未报道
采矿/矿石	28 000	107 000	96 667
核反应堆***	7.7	65	20

* 经济合作与发展组织(OECD)的估计值,《环境数据,1993年纲要》

** 联合国统计委员会和欧洲经济委员会的估计值,《欧洲和北美环境,带注解的统计数字,1992》。《能源经济问题》1993年1月/2月号“核电厂废物处置的国际比较”一文对核反应堆废物的估计值。未提供农业废物估计数字。

*** 引自1994年4月《IAEA废物管理概况》包括低中放废物在内的估计值(德国除外)。假定2吨相当于1立方米,将低中放废物数据从立方米换算成吨。高放废物不会改变这些数字。

注:上述数据应只用作大致的“数量级”指标。国家间的比较可能意义不大,因为它们对废物类型采用不同的定义和采用不同的计算方法。能源生产数据不包括采矿废物,报道的数据不包括其他国家在进口燃料的开采期间产生的废物。

家里,工业部门、公共部门和能源生产部门产生的固体废物占很大比例。(见图。)值得一提的是,核动力厂产生的放射性废物量只占所有能源生产产生的废物量的一小部分。

正在产生的废物数量的继续增加和对保护人类健康与环境的合适处置设施的需要,已导致一些联合国组织更多涉入废物管理问题。1992年6月在里约热内卢举行的联合国环境与发展大会(UNCED),除讨论许多其他环境问题外,还为讨论与废物管理有关的可持续发展战略提供了国际论坛。“21世纪议程”,即参加UNCED的各国政府一致同意的可持续发展行动计划,反映了世人

对废物问题关注的严重性。“21世纪议程”有三章专门针对废物管理,其他许多章中也提到废物管理问题。

通过UNCED和“21世纪议程”,联合国和世界各国政府要求全世界关注制定人类社会可持续发展的全面战略的必要性。“21世纪议程”包括若干声明,这些声明强调减少正在产生的废物量是任何这类战略的必不可少的部分。“21世纪议程”中还承认,无论为获得更清洁电力所付出努力的成就如何,废物总是社会发展的一种后果而且将继续产生,因此必须继续有能保护健康和环境的处置方案。现有的数据支持这样一种论

点,即通过核动力进行的电力生产所产生的废物量最少,这可能有助于使核动力成为更清洁电力生产和可持续发展的全面战略的有益贡献者。

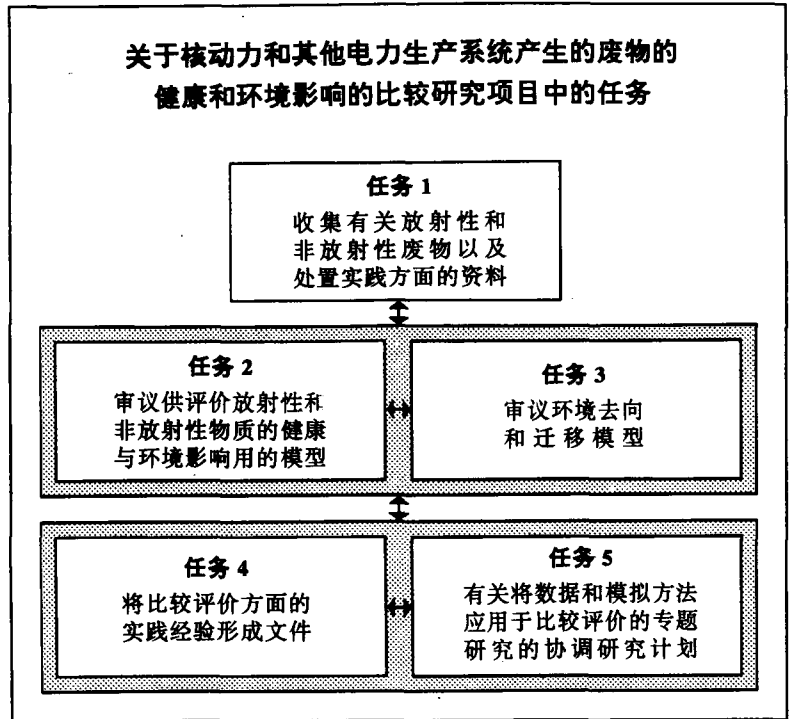
IAEA 的项目和计划

IAEA 正在实施一项比较性评价计划,目的是论证核动力在电力生产部门的更清洁电力生产和可持续发展的全面战略中的作用。此计划考虑健康和环境影响以及电力生产许多方面的费用,其中包括电力生产能源链的各个阶段正常运转费用和事故费用。IAEA 正在与其他一些国际组织合作实施的 DECADES 项目是该计划的重点。其目的是提高在能源规划和决策过程中把健康和环境问题纳入比较性评价不同能源链和战略中综合考虑的能力。该项目的重点是,开发可用来帮助这种决策的计算机手段(数据库、模拟软件等)。

IAEA 的这个全面计划的一部分(它的执行多少有点独立于 DECADES 项目)是本文的主题。1995 年,IAEA 开始实施一个项目,其重点是比较用于评价核电及其他电力生产系统产生的放射性与非放射性废物处置造成的健康和环境影响的方法。此项目的目的是:(1)收集、评估和向成员国分发与核动力和其他能源产生的放射性和非放射性废物处置有关的潜在健康与环境影响的数据和资料;和(2)评估与检验用来评价和比较核及其他能源系统产生的废物处置造成的潜在健康与环境影响的方法。

许多组织——联合国工业发展组织(UNIDO)、联合国教科文组织(UNESCO)、UNEP、UNEP 巴塞尔公约秘书处、世界卫生组织(WHO)、联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)和国际海事组织(IMO)——都通过积极参加会议、为报告提供素材或对报告进行审议、或简单地提供对该项目有用的信息资料,对该项目正式或非正式地作出过贡献。

该项目被规划成包括性质上重复和平



行的 5 项任务。(见图。)第一项任务是,鉴定和比较电力生产系统和其他来源产生的废物的数量、一般特征及其处置方法。第二和第三项任务被分别规划成包括审议用于评价放射性和非放射性物质造成的环境和健康影响的方法,以及用于评价不同类型废物的环境去向和迁移的模型。这两项任务将提供能使与废物有关的健康和环境危害以定量方式得到评价和比较的资料。第四和第五项任务被规划成包括通过检验第二和第三项任务中关于评价核电和其他电力生产系统产生的废物的潜在健康和环境影响的方法取得的实践经验。在第五项任务中,这种经验被规划成要通过涉及一些不同国家的专家的协调研究计划所包括的专题研究来获得。

有关废物和处置方法的数据,可以用来补充作为 DECADES 项目一部分而开发的数据库。但是,由于各场地的废物、处置方法和环境条件各不相同,以及存在一些与模拟废物从处置设施中长期释放和迁移有关的独特问题,正在多少与更传统的大气和运行风险评价方法有些分开地审议本项目的

一些材料中的放射性核素含量

材料	放射性核素浓度(平均值或最高值)
钻管和采出水处理设备污垢和污泥	高达 5000 Bq/g(Ra-226) (平均 1 至数百 Bq/g)
天然气供应设备污泥	高达 100 Bq/g(Ra-226)
采出水蓄水池污泥	高达约 40 Bq/g
煤/褐煤	0.001—100 Bq/g(U)
泥炭	高达 50 Bq/g(U)
地热废物	约 5 Bq/g(Ra-226)
铀采矿废岩堆	约 1 Bq/g(Ra-226)
饮用水处理废物	污泥—约 1 Bq/g(Ra-226) 树脂—约 1,000 Bq/g(Ra-226)
磷肥	约 5 Bq/g(U-238)
磷酸盐岩处理废物	矿渣—约 1 Bq/g(Ra-226) 污垢—约 40 Bq/g(Ra-226)
矿石处理废物	约 1 Bq/g(Ra-226)

注:这些数值包括对最大值、几套具体数据的平均值或一般数值范围。在许多数值中,只给出与一种核素有关的放射性,尽管知道还存在有其他许多核素。因此,这些数据应用作这些材料中存在的放射水平的大致指标。

评价方法。这些任务的重点是,审议和检验用于评价和比较与不同能源链废物处置有关的短期与长期影响的独立的模拟方法,和提供关于不同情况下不同模拟方法的有效性的反馈。这种反馈将有助于成员国根据它们的具体情况选择和利用评价废物处置影响的方法。

不同类型固体废物的健康和环境影响的比较性评价结果,可能有若干潜在的应用。它们可被用作(1)各种能源系统的影响的整体比较的一部分;(2)废物管理政策决策的辅助手段(使决策者能够比较不同类型废物的影响和可供选择的管理/处置战略);和(3)用于评估含放射性核素、非放射性有毒元素/化合物或二者兼有的废物的处置造成的潜在影响。

电力生产能源链产生的废物

人们利用各种不同的能源发电。通常,这些能源被划分为“常规”能源,包括煤、石油、天然气和铀/钍等燃料;或“可再生”能源,包括太阳辐射、风、地表水、生物燃料和地热等能源。尽管其中的有些能源(如太阳辐射、风和水等),除维护和其他一般活动外,不一定会因运行产生废物,但仍产生与采矿和原材料加工及太阳能电池、风机和水坝等的建造与退役有关的长期有害废物。

为了鉴别与一种选定的电力生产系统有关的不同放射性和非放射性废物,方便的做法是把废物按照在能源链中的各个不同阶段进行分类。就本文来说,总能源链的定义是包括提取、燃料制备、电厂运行和退役等各阶段。注意,建造、维护、运输和处理过程产生的废物,按情理应在能源链的每一阶段加以处理。

由于公众的注意力集中在用常规燃料发电上,人们常常感到,与用常规燃料生产电力有关的大多数废物是电厂设施运行的结果(如各种灰渣、乏核燃料)。然而,正如前面已讨论过的那样,UNEP、OECD 和 UNSC/ECE的数据表明,世界上两种最大的废物源之一是采矿工业。

这种情况也反映在电力生产部门。对于许多电力生产系统来说,在燃料(煤、天然气、石油和铀/钍)提取期间产生相对大量的废物。例如据 UNSC/ECE 报道,德国 80% 以上的采矿/矿石废物是由于煤矿开采产生的。同样,用于建筑材料(各种金属、混凝土等)、处理过程(如用于烟道气除硫或 PGD 的石灰石)、用作生物燃料的肥料以及如太阳能电池等专用部件制造的矿产的开采,都导致废物的产生。废物产生的量和毒性随提取方法、所需燃料/矿物的数量和资源的质量而异。

由于生产一定量的电力需要大量燃料,煤矿开采通常产生最大量的采矿废物。但是,铀/钍开采也能产生大量来自核能链的废物。同样,其他许多能源链也产生大量采

矿废物(如用来靠太阳辐射发电的光电池在其制作中需要大量的各种金属化合物;生产生物燃料用的肥料常常需用磷酸盐;和为了生产建造水坝、电厂、运输设备等所必需的材料,我们必须开采大量的原材料)。采矿工业的另一个大的废物源,是在开采期间从矿山泵出的地下水或矿山关闭后流经矿山的水。这种水可能含有各种各样的污染物,其中包括自然产生的放射性物质,通常缩写成 NORM(如钍、铀、镭),痕量金属(如铝、汞、铬、镉、铅、锌、砷等),各种盐以及硫。煤矿水还可能含有水平增高的碳氢化合物。

虽然人们常常把天然气视为“清洁”能源,但天然气和石油的勘探和钻孔是大的废物来源。从这些作业中产生的废物包括积蓄在管道内的放射性污垢、钻孔泥浆以及被泄出的石油和处理采出水污染的土壤。积蓄在管道内的污垢可能含有大量放射性核素(见第 30 页表),并需要作为放射性废物来处置。钻孔泥浆可能受到盐类、痕量金属(硒、砷、镁、铜、锌、铬、镍、铝和铁)以及石油和其他润滑剂的污染。石油和天然气的提取也伴有大量来自含天然气或石油建造的“采出水”(高达 300 万升/天)。这种采出水含有各种各样的污染物,其中包括 NORM(尤其是镭)、痕量金属、氨、盐类、脂肪族与芳香族石油碳氢化合物、酚和萘。采出水水池中的污泥,受到水中浓度增高的金属、有害物质和放射性核素的污染。钻孔作业也产生包括石棉、杀虫剂、聚氯联苯(PCB)和三氯乙烯在内的各种各样的有害废物。

总能源链中的第二阶段是燃料制备。燃料制备也是大的废物来源。对常规燃料来说,燃料制备包括洗涤原煤以除去杂质、提炼石油产品以及核动力方面的矿石加工和燃料生产。由采矿活动后产生的废物包括尾矿、水和受到与采矿废物(如痕量金属、盐类、金属和 NORM)类似的物质污染的固体。精炼厂产生废油与废水,受到 NORM、碳氢化合物、痕量金属、PCB 和其他污染物污染的各种污泥。为核动力厂制造燃料产生包括玷污有 NORM 和痕量金属的灰和污泥在内的废物。太阳电池(光电池)的制造可以看成

类似于为利用太阳能而制备燃料。太阳电池(光电池)的制造产生各种受砷、铜、镉、镓和锌化合物污染的有毒或有害废物。

能源链中的第三阶段涉及发电厂运行期间产生的废物。这些废物是公众最重视的,因为它们往往受到最大的关注。燃煤电厂产生大量的燃烧废物,包括因燃烧燃料产生的飞灰(气载燃烧产物)和底灰(较重的燃烧产物),以及由不同 FGD 工艺产生的石膏和污泥。这些废物受到 NORM 和痕量金属的污染。有点令人啼笑皆非的是,为减少化石燃料设施排放的温室气体而采用的烟道气除硫技术所产生的废物竟多于燃烧燃料产生的灰。人们正在大力推进飞灰和 FGD 废物的回用,大量这类废物正用于其他用途(如水泥添加剂、回填材料、建筑材料中的石膏和许多其他用途)。但是,即使回用,所产生的大量灰和 FGD 废物还是远远超过需求量(据估计,世界每年未被利用的这类废物超过 4.5 亿吨)。燃油电厂产生的灰量较少,但它是 FGD 废物的大的来源。而且,有些锅炉清洗和废水处理废物也含有害物质。

核动力厂运行产生的废物尤其是乏核燃料,可能是世界上研究得最多的废物。然而研究数据表明,核动力厂产生的废物量与整个电力生产系统产生的废物量相比是很少的。对核废物的主要担忧是,尽管其高放废物量极少,但其中的放射性水平较高。一些国家对乏燃料进行后处理,从而减少与必须处置的废物有关的长期危害。核动力厂运行也产生低中放废物。这类废物包括各种废料、管道和被较短半衰期放射性核素污染的废旧设备。

电厂关闭后的退役是总能源链中的最后阶段。对燃煤、燃油和燃天然气电厂来说,退役废物包括建筑碎石、来自电厂的旧设备和因运行产生的受污染的土壤。这些材料将被燃烧副产物和其他与电厂运行有关的物质污染。核电厂退役产生的废物不同于其他电厂产生的废物,因为反应堆堆芯或一回路冷却剂附近的材料可能由于主要的短寿命核素放射性水平升高而需要进行特殊处理。太阳电池、水坝和风机的退役,也将产生

必须加以管理的废物。尤其是大阳电池将含多种对人类健康产生潜在长期危害的有害化合物。

若干种废物,是作为能源链每个阶段中的建造、维护、运输和废物处理过程的结果而产生的。对所有能源链来说,一般的建造、维护和运输废物多半是有代表性的,但污染的数量、类型和程度却将因能源链而异。例如,对燃煤电厂来说,由于每天必须运送大量的燃料和最终产生的灰和废物,所以与运输有关的废物量是相当大的。据估计,为把一座典型的 1000 MWe 燃煤电厂产生的飞灰和 FGD 废物运送到处置场,每天将需要使用 50 辆 40 吨的卡车(如有可能,也可用火车或其他运输工具)。完整的寿命周期分析需要把生产卡车或火车用燃料产生的废物和与维修这些运输工具有关的废物考虑在内。在全面比较中还将需要考虑,用来处理许多这类废物的处理过程产生的二次废物的处置。

天然放射性物质

上面所讨论的许多废物,尤其是与提取、燃料制备和燃烧副产物有关的那些废物,都含有天然放射性物质(NORM)。NORM 包括碳-14、钾-40、铀-238、镭-226 和钍-232 等同位素。(见表。)含 NORM 废物的一个重要方面是,它包括若干长寿命放射性核素(如半衰期为 45 亿年的铀-238、半衰期为 140 亿年的钍及其包括镭在内的子体)。人们对 NORM 的担忧主要是由于与 NORM 有关的镭及其子体的放射性对人体健康有影响。

由于公众的注意力集中在核电厂产生的放射性废物上,其他能源链产生的废物中的放射性核素过去一直很少被注意。但是最近,在适用核废物法规越来越严的情况下,鉴于与含 NORM 废物中的放射性核素有关的长半衰期和潜在危害,监管部门不得不研究非核能链产生的废物中的放射性核素。

这一点可以用石油和天然气工业产生

的 NORM 废物的两个例子来说明。第一,现在常把沉淀在油、气井和生产管道内侧的污垢认为是一种放射性废物。值得注意的是,在某些情况下,已证明这类污垢含有的镭-226 的浓度已达到可在近地面设施中加以处置的低、中放废物中 α 浓度国际标准的上限。第二,对采自石油和天然气钻井现场油、气井中的大量采出水的研究表明,所调查的美国三个州的油、气井中,有 50% 至 78% 的井产出的采出水含有平均浓度超过 1.85 Bq/L (50 pCi/L) 的镭。其他数据表明,某些油、气井中采出水的平均镭浓度高达 111 Bq/L (3000 pCi/L)。比较而言,美国核设施排放的水的镭浓度限值约为 2.2 Bq/L (60 pCi/L)。尽管在某些情况下有必要考虑产业的特殊要求,但显然必须与对核电工业的要求进行比较。

电力生产产生的废物的处置方法

虽然“21 世纪议程”强调生产更清洁的电力,但在新的工艺技术可供利用之前可以预计,能源燃料链会产生大量废物。因此,将需要有合适的处置方法。能源燃料链的最终的健康和环境影响,在某种程度上将取决于所用的处置方法。目前对电力生产能源链产生的废物采用各种各样的处置方法。下面简要介绍这些方法。

在提取和燃料制备阶段,所产生的大量废物通常不需要任何坚固的工程处置技术。在某些情况下,把挖出的泥土和岩石(废石)回填到采矿掘出的岩洞内或散放在地表上。但是,在许多情况下,现在把采矿废石(废物)用专设掩盖物保护起来,以便使渗流水绕过有潜在危害的废物区。石油和天然气钻孔产生的废物,通常注回原地层、置于钻井现场矿坑中,或散放在现场地表上。

煤和核能链产生的燃料制备废物,包括大量通常要在蓄水池(人造水池或氧化塘)内进行处置的液体废物。燃料制备产生的固体废物(如尾矿和蒸发残留物)常常用专设覆盖土盖起来,以便最大限度地减少渗流水

进入这些废物和限制气体从这种废物中释放出来。炼油厂产生的废物常常用土地耕作来处置或在坑孔里处置。炼油厂或太阳能光电池制造产生的有害废物通常要送到被许可的设施里处置。典型的有害废物处置设施,包括一个与沥滤液收集系统连接的有衬里的地沟和一个专设土盖,以限制水与废物接触。与燃料制造有关的其他废物通常要处置在浅埋坑里,而在有某些核废物的场合要处置在专设地沟里,或混凝土拱顶地下室里。

燃煤和燃油电厂产生的飞灰和 FGD 废物等运行废物,一般处置在水池、浅埋坑、开采岩洞里或地表废物堆里。水蒸发和排放后,残留在处置水池底部的污泥通常用土壤覆盖。燃煤、燃石油和燃天然气电厂的锅炉冲洗废物必须作为有害废物加以处理,这种废物需要在被许可的设施内处置。核电厂产生的低、中放废物常常被处置在专设地沟、混凝土拱顶地下室或开采岩洞里。这种废物在处置前通常要进行包装。包括乏燃料在内的高放废物,被计划处置在深地质建造中或以可回取方式贮存起来。

未来的方向

“21 世纪议程”,即世界各国政府在 NUCED 上一致同意的可持续发展行动计划,已把更清洁的电力生产(即需要减少目前不断产生的废物量)确定为人类社会可持续发展战略的一个主要因素。可持续发展必不可少的电力生产是废物的一个来源,因此必须减少其产生的废物量。为了评价核动力在更清洁电力生产和可持续发展的全面战略中的作用,IAEA 开始实施一项题为“能源系统产生的固体废物对健康和环境影响的比较研究”的项目。

该项目的第一项任务的重点是确定电力生产能源链产生的废物的数量和类型及其有关的处置方法。该项目其次的任务,包括审议和检验可用来比较与废物处置有关的潜在健康和环境影响的方法,例如可用来比较这些废物中的一些放射性和非放射性组份在环境中的释放及随后的迁移对健康和环境的潜在影响的方法。这些审议活动,将包括对有关已进行的其他比较性评价研究的讨论。比较放射性核素和非放射性有毒元素/化合物的健康与环境影响的方法,以及模拟这些污染物在地下和地面环境中的去向与迁移的方法,将是与废物处置有关的比较性评价中的关键部分。

本文概述了迄今所获得的与该项目第一项任务有关的资料中的一些资料。在这方面,已对核动力和其他能源链产生的废物的性质与废物量提出一种看法。资料表明,核动力产生的废物量既占产生的总废物量的一小部分,也只占电力生产所产生的废物的一小部分。这个事实支持核动力在更清洁电力生产和人类社会可持续发展战略方面的潜在有利的作用。

本文也强调了研究电力生产能源链中所有阶段的重要性。对能源链中每个阶段的详细审议表明,即使被认为是“清洁”的能源链,如太阳能(产生有害金属化合物)和天然气(产生放射性的和有害的钻孔与管道废物),都会导致具有潜在长期健康和环境影响的废物产生。此外,有些能源生产链产生的大量废物(如飞灰和烟道气除硫废物)都带来了一些处置问题。

此项目今后的工作重点将集中在更准确地确定和量化目前对能源燃料链有典型意义的废物与处置实践;审议和检验现有的可用于模拟这些废物中污染物去向和迁移的方法;以及计算有关的健康和环境影响。

□