评估发电燃料链产生的废物

寻找共同的基础

ROGER SEITZ

核燃料链放射性废物处置的安全评估一直作为例行程序进行，并经常接受详细的公开讨论。然而，对非放射性的有害废物或含有由于自然资源开发而产生的浓度增强的天然发生放射性物质的废物，一般却不进行这种评估。这两种不同做法的逻辑性尚不清楚，因为这些废物中有许多也含有一些若不妥善管理对遥远未来人类健康构成潜在影响的物质。

当比较各种能源方案时，重要的是要对整个发电燃料链（包括提取、燃料加工、电厂运行和退役）产生的废物的处置实践的安全性，取得正确的看法。为此，IAEA在其比较评估各种能源来源的总体计划框架内，提出一项关于“不同能源发电系统的废物的安全相关信息”的项目。

该项目的目标是提供有关各种燃料链所产生的废物的量、特征和处置实践的信息，以及评价用于评估和比较对人类健康和环境的影响的方法。作为该工作的一部分，已开始实施一项协调研究计划（CRP），以便为解决比较评估方面的重要问题提供数据资料和实用经验。

核及非核燃料链产生的废物包括放射性物质和非放射性物质的组合。因此，需要考虑的一个重要问题是，需要有一些协调一致的方法，以便在共同的基础上，评估可能置于各种不同处置设施中的放射性物质和非放射性物质的潜在影响。本文旨在介绍目前为解决评估不同放射性废物处置实践可能产生的对人类健康的影响而提出协调一致的方法过程中遇到的一些关键问题所提出的建议方面的信息。该项目的其他方面（本文未予介绍）包括生态影响和环境影响（例如对动植物群的影响以及对土地使用的影响）和运行设施产生的排放物的影响。

国际合作。除IAEA外，还有许多国际组织（包括国际放射防护委员会（ICRP）、联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）、欧洲委员会（EC）、联合国环境计划署（UNEP）、世界卫生组织（WHO）、以及经济合作与发展组织（OECD））也在处理与放射性废物和（或）有害废物处置相关的健康效应和环境效应方面的问题。因此，IAEA这一项目在实施过程中，也在酌情利用来自这些组织的输入。

例如，就放射性物质而言，ICRP具体规定的剂量响应函数已纳入IAEA的细则中，供国际上使用。就非放射性物质而言，国际组织和国家监管者利用不同方法和数据导出剂量响应函数。

Seitz先生是IAEA辐射与废物安全处职员

废物地表处置

无覆盖物地表处置是针对某些类型废物所采用，能够提供最低限度长期保护的系统。它设想将未经固化的液体或固体废物处置在地表，无覆盖物或专设设施（地表圈围可考虑使用衬里）。这种方法可以作为一种拟议的实践加以使用，它也可能是在近地表处置设施情况下随着时间推移因覆盖物材料风化和/或专设屏障性能降低而形成。

照片：（左上）燃油或燃天然气能源生产过程中产生的废物，可处置在所谓的陆地处置场。（左下）临时铀矿冶尾矿池鸟瞰图。它将排干，并在关闭后用多层专设屏障履盖。

能源燃料链*产生的固体废物处置实践实例

	地表处置**	近地表处置***	地质处置	海洋处置
核				
—放射性		■	■	
—非放射性		■	■	
煤/褐煤				
—放射性	■	■	■	
—非放射性	■	■	■	
油/天然气				
—放射性	■	■	■	■
—非放射性	■	■	■	■

* 包括燃料链产生的固体废物（不包括运输、维护、建造等过程中产生的废物）。

** 处置，但无覆盖物。

*** 包括地表处置（埋填覆盖等）和几十米深处处置（所有近地表设施都被认为是用来覆盖废物的措施）。

重要问题。为在共同的基础上评估与不同发电燃料链固态废物处置有关的健康效应，需要解决各种不同的问题。本文讨论其中的两个问题。

第一个问题涉及开发一种容易处理的方法，使与发电燃料链有关的各种不同类型的废物、处置实践和环境条件的评估协调一致。（见第36、37和38页方框和照片。）第二个问题是需要建立一种能够比较与放射性核素

加覆盖物的废物处置

近地表处置方法是一种提供不同程度长期保护的系统。它将经固化的(例如水泥固化、沥青固化等)或未经固化的废物埋于近地表(地下水位上下)。关闭后,设想用干净的土壤/岩石或其他较复杂的多层专设覆盖物覆盖。此方法还可以包括在专门废物货包和/或混凝土室中处置。

照片:(右上)低、中放废物处置场。采用混凝土室或处置货包。加覆盖物,以防处置作业期间发生泄漏。处置场关闭时,加覆多层专设覆盖物。(右下)煤灰和采矿废物处置场,没有专设屏障。

和非放射性物质有关的健康效应的方法。

不同之处和相似之处

与发电燃料链有关的废物管理涉及各种不同形式的废物、处置设施和当地环境(见《IAEA 通报》1996 年第 38 卷第 2 期)。

任何类型的废物的处置造成的潜在健康效应取决于与这些不同之处有关的几种因素的组合,这为比较评估提出了一个挑战性问题。这些因素包括废物量、废物中污染物的毒性和浓度、废物的物理/化学形态、被处置废物周围有无屏障以及与居住在处置场附近居民有关的环境条件和人口统计数据/习惯。

放射性物质和非放射性物质。许多与发电燃料链有关的废物包括放射性物质和非放射性物质组合。例如,核燃料链废物除放射性核素外,还包括有毒金属和(或)有害有机物质。

非核燃料链产生的废物中,放射性核素常常是伴随这种燃料或其他原材料提取的天然发生的放射性物质产生的,浓缩在废物中。因此,用于比较评估的方法将得益于在共同的基础上评估放射性物质和非放射性物质的影响的能力。这一问题的解决办法是与这一 IAEA 项目有关的协调研究活动的重点所在。

相似处和不同处。尽管

废物地质处置

废物的地质处置是一种提供实质性长期保护的系统。将经固化的和未经固化的固体废物置于深的矿穴中，或将液体/浆状废物注入几百米或几百米以上深处的地质岩层中。这些方法可以包括使用混凝土处置室、废物货包或专门设计的竖井或巷道密封等专设屏障。

照片：(左上)低、中放废物处置在硬岩层中。(左下)放射性和非放射性有害废物处置在盐岩层中。

人们常常有一种印象，即放射性物质与非放射性物质之间有很大的不同，但两者之间的确有许多相似之处。(见第 39 页方框。)

就其在环境中的行为来说，一些放射性核素(例如碳-14、碘-129、钚-239、氡-226和钍-232 等半衰期长的放射性核素)持久存在，需要采取较长期内有效的处置办法。许多非放射性物质(例如不衰变或降解的金属)也属于这种情况。

其他一些放射性核素和若干非放射性物质(例如钴-60、铯-137、锶-90 等短寿命放射性核素和可降解的有机物)能够在比较短的时期内衰变。这些物质的处置造成的潜在效应，在其衰变或降解到安全水平之前，可通过控制基本上加以消除。

就健康效应而言，一些放射性核素和若干非放射性物质被认为是基因毒性致癌物，因此其健康效应能够用类似方式加以模拟。确定这些相似之处，是协调包括放射性物质和非放射性物质在内的废物的评估过程中的重要步骤。放射性物质和非放射性物质之间的一些不同之处，对提出协调一致的评估方法构成挑战。

更具挑战性的问题之一，与因接触不同物质所产生的健康效应的不同有关。癌的形成是放射性核素和许多非放射性物质的一个受关注的效应。

然而，接触发电燃料链废物中存在的非放射性物质，能够产生其他效应(例如肾衰竭、大脑损害和生殖影响)。癌之类基因毒性效应一般以不同于其他类型效应

对人体健康和环境有潜在危害的物质

	放射性物质	非放射性物质
地球上天然发生的	铀-238、钍-232 及其子体（例如镭-226）	砷，镉，铬，镍
滞留持久的物质*	钚-239、碘-129、碳-14（核设施产生的废物）镭-226、钍-232（天然发生的放射性物质产生的废物）	砷，镉，铬，汞，镍，多氯联苯
短寿命物质**	钴-60、铯-137 和锶-90	苯，甲苯，氯乙烯
转变成更具危害的物质	钚-241 衰变成镎-237 镭-226 衰变成氡-222、铋-214 和铅-210	无机砷或汞被细菌转化成甲基化形式 苯芘的氧化

* 如果浓度大的话，要求较长时间隔离
** 要求隔离的时间足以使有害物质衰变或降解到可接受水平

的方式加以治疗。这两种类型的效应，可称为非阈效应和基于阈的效应。

基因毒性致癌物，通常假设为线性非阈模型。该模型意味着，随着剂量的增加，癌发病率的概率增加（即任何剂量都有引发癌的可能性，尽管在低剂量下概率很小）。

所有放射性核素和许多非放射性物质（例如砷、苯和镍），均被认为是基因毒性致癌物。在这两种情况下，都要求出因具体物质而异的剂量-响应函数，将给定水平的照射量或剂量转换为癌危害。

一般将人类照射量的流行病学数据和（或）动物研究的实验室数据，用作剂量-响应函数的基本依据。

在这两种情况下，剂量-响应函数通常基于较高剂量下的观察数据。然后根据线性非阈假设将这些函数外推，使之适用于与废物处置设施潜在释放有关的低剂量。

对于基于阈的效应而言，有证据表明存在着这样的剂量或照射量水平：低于它便不会发生任何效应。不同组织采用不同术语来说明这些阈剂量或照射量。从事评估的各个组织所用的监管阈值推导方法不是标准化的。

为制定协调一致的方法而努力

本文上面所提到的两个重要问题涉及：(1)提出评估各种废物和处置实践的协调一致的方法的必要性，和(2)建立在共同的基础上比较放射性核素和非放射性物质各自效应的方法的愿望。为解决这些难题，正在考虑若干种方法。

开发参考处置实践和生物圈。与发电燃料链有关的废物可以是液体或固体。它们还可以固化在固体基质中，并置于不同类型的容器中。此外，这些废物周围可设或可不设人工屏障，置于无

覆盖物的地表、地表覆盖物的下面或近地表一定深度中或地质岩层中。

如前面所述，这些因素每一个都能够对给定处置概念相关的潜在健康效应和环境效应产生影响。IAEA 正在制定一套与典型实践或计划一致的废物和处置方法参考类目，以帮助促成协调一致的评估方法。为了使不同废物处置实践的评估有更好的一致性，正在针对废物形式和参考处置实践的每个适用组合确定相关的污染物运输途径和照射情景。

提出了 3 种不同的参考处置实践：地表处置（无覆盖物）、近地表处置和地质处置。确定这些类目的原因是，例如，针对某种给定的废物需要考虑的可能运输途径（空气、地下水和地表水等）和受照射情景（饮用水、受污染食物、直接接触废物等）与处置设施的类型密切相关。

例如，气载（悬浮）废物颗粒的吸入或摄入、废物中污染物的直接地表水运输、废物通过侵蚀运输以及废物的直接摄入（土壤摄入）只是对地表无覆盖的废物是可信的。

这 3 个类目每一类中，都涉及若干不同形式的废物和（或）人工屏障。它们包括覆盖物和其他屏障，能够影响具体情况下要加以考虑的运输途径和受照射情景。

例如，将废物密封在灌浆的混凝土容器中并将该容器置于混凝土处置室，即使没有排除也将大大限制污染物在该容器有效寿期内的释放。此外，如果混凝土屏障保存完好，即使覆盖物受到侵蚀，与废物直接接触也是不可能的。因此，在建议的框架内考虑废物形式和处置实践时，需要确定有关的废物运输途径和受照射情景。

协调一致的框架的最后部分是开发供评估使用的参考生物圈。目前的建议包括开发多种参考生物圈，以便代表不同的气候条件（例如热带、温带）和人类的特性和习惯（主要基于 ICRP 的推荐意见，但也基于其他可能的选择，以承认具体的文化差异）。

有限的一套参考生物圈应提供充分的选择，以体现不同文化的生活条件以及不同气候情况。作为这一 IAEA项目的一部分而正在进行的试验案例的国别结果连同较早期的 IAEA 项目（称为 BIOMOVS 和 BIOMASS）的结果，将用于开发供比较评估使用的参考生物圈。

总之，协调一致的框架需要使不同层次的废物封隔或隔离的好处区分开来，这对比较评估来说至关重要。该框架还将在做出有关运输途径和受照射情景的假设方面，提供一定程度的一致性。预期许多不同的分析家在做比较时，都会将此作为一个重要的考虑因素。

健康效应比较的共同基础。如前所述，健康效应可分为两大类（即基于阈的效应和非基于阈的效应）。对于放射性核素而言，需要考虑非阈效应；而对于与发电燃料链有关的废物释放物中的非放射性物质而言，需要考虑阈效应和非阈效应。

第一步是寻求一个通用方法，在共同的基础上比较放射性核素和非放射性物质的非基于阈的效应。然后有必要寻找一种办法，将这些非阈效应与由于接触一些非放射性物质而致的阈效应进行比较。作为 IAEA 协调研究计划的一部分而进行的试验案例，主要目的是获得对各种不同废物实施不同比较方法的实际经验。

视为是基因毒性致癌物的非放射性物质和放射性核素，都被认为具有基于线性非阈模型的癌危害剂量-响应函数。表面上，通过简单地比较癌危害来直接比较健康效应似乎是可能的。

然而，如果采用这种方法，那么应该认识到，放射性核素和非放射性物质的剂

项　目　结　果

迄今通过IAEA项目在废物方面所做的工作已得出若干令人感兴趣的结果。这里介绍其中的两个。它们说明，即使不经常做详细的评估，与非核燃料链产生的废物的处置有关的潜在危害也需要仔细考虑。

不同燃料链产生的含有浓度增强的天然发生的放射性物质(NORM)的废物，通常没有经过因址而异的评估，以确定与其处置有关的潜在危害。(有关这些废物的介绍，请见《IAEA通报》1996年第38卷第2期。)不过，通过一种比较简单的计算可以说明，这些废物有许多可能导致超过ICRP限值的剂量。

右图说明了居住在含有NORM废物地区的个人所受辐射剂量的计算结果。由于以前在该场址开展的活动，这类废物已在地面扩散。结果表明，地面15 cm厚的土壤中1Bq/g的钍-232或镭-226(子体随着时间推移达到平衡状态)，仅由于外剂量途径就导致超过1 mSv/年的剂量(ICRP实用剂量限值)。这表明与含浓度增强的NORM废物有关的潜在危害应仔细评估，以支持关于(在综合评估中还需要考虑氡的吸入或摄入途径)可接受管理实践的决定。

曾经从非放射性危害的角度，为EC进行过一项令人感兴趣的研究。这项研究说明通常用于评估放射性废物的技术，可用来评估与废物中的非放射性物质有关的危害。研究中使用了一套计算方法，针对可置于混凝土室型设施中的核电厂退役废物中非放射性物质浓度导出一套"限值"。利用这些导出的"限值"，研究得出的结论是：由于非放射性污染物的浓度，退役钢材可能需要处置在地质设施中。为对比起见，将EC研究中导出的"限值"与本项目执行期间确定的其他发电废物的非放射性物质的浓度进行了比较。(见表)。根据这项研究的逻辑，该表表明混凝土室可能不能为某些煤灰或燃料链的某些其他常见废物提供足够的隔离。目前煤灰和其他废物通常是在得不到混凝土室提供的附加屏障的好处的情况下处置的；因此这种情况下的限值可能比EC研究中针对混凝土室设施导出的那些限值更具限制性。

这个例子说明，与非放射性废物处置有关的危害值得在比较评估中加以考虑。它还表明，当根据初步计算结果为废物处置设施做出结论时必须小心。总之，这个实例强调在得出关于给定的废物处置实践的最终结论之前，开展因场址而异、因设施而异和因废物体而异的研究的重要性。

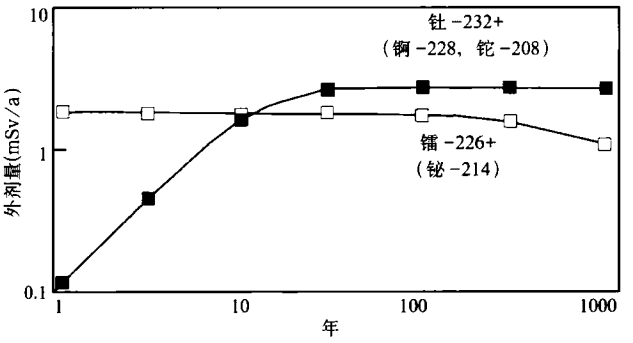
燃料链废物中各种物质浓度比较

物质	样品浓度(mg/kg)		
	铬	汞	镍
煤灰/煤渣	1－200	未报道	50－300
PP洗液污泥	<1－10000	0.1－3	28－20000
FGD污泥	3－210	<1－70	20－240
核电厂退役钢	3000	未报道	2000
MSW灰/渣	200－2300	50	50－180
炼油污泥	10－5080	2.1－4	40－2000
"限值"*	70	5	1000

* 废物近地表处置的限制浓度值在下述报告中有计算："Application of Procedures and Disposal Criteria Developed for Nuclear Waste Packages to Cases Involving Chemical Toxicity", Little et. al., EUR 16745EN, European Commission(1996).

注：PP＝发电厂；NPP＝核电厂；FGD＝烟道气脱硫；MSW＝城市固体废物

天然发生的放射性物质外辐射剂量实例



量-响应函数的基础可能是不同的。这种不同包括将高剂量时观察到的效应外推到低剂量时的危害所采用的方法不同。在废物处置场合，低剂量比较常见。

可用于比较基于阈的效应和非基于阈的效应的方法，是比较难以确认的。一种建议是将阈剂量与导致特定癌危害的剂量进行比较。这种建议假设，存在一个与阈剂量相当的癌危害水平。

这种方法的优点是它提供一种较为直接的比较。不过，也有一些缺点。例如，它会引发与阈值直接比较的癌危害值选择方面的争论。它还涉及实验观察到的（基于阈效应）数据与某些情况下从高得多的剂量（在这种剂量处已经实际观察到效应）外推得到的癌危害数据的比较。

另外两大类比较方法，也正在考虑之中。它们被称为基于“保护裕度”方法和“照射量裕度”方法。

第一种方法涉及某种物质的预计剂量与某一国际组织或国家监管部门的因物质而异的标准的比较。这为比较提供了一种比较简单的方法。

这种方法的缺点包括这一事实：比较不一定总是基于与健康有关的考虑。这是因为在一种监管框架内，个别物质的标准可能基于例如美学、费用/效益或其他考虑，而不是基于严格的健康考虑。

第二种方法涉及预计的照射量与日常环境中的实际照射量的比较，或与已观察到实际健康效应的照射量的比较。

这样做的优点在于比较的基础与实际照射量或实际健康效应相联系，而不是与导出的标准相联系。

例如，接触已处置的废物中的砷或辐射而受到的预计照射量，将与接触自然环境中的砷或放射性而受到的预计照射量比较。此外，从更为以健康为基础的角度看，预计的照射量可以与已导致观察到的健康效应的照射量进行比较。这是一种能够用来避免将决定建在高剂量观察数据外推得出较低剂量假设效应的潜在方法。

这种方法的若干缺点在于下述含蓄的假设：第一，自然照射量水平是可以接受的；第二，剂量只是在已观察到效应的水平才有意义（对于基因毒性致癌物，这一点特别有争议）。

未来的方向

通过 IAEA 支持的活动，所建议的一套参考处置实践和废物形式已经确定。此外，还有每种情况下应考虑的运输途径和照射量情景的配套建议。一套反映世界不同地区气候条件和生活条件的参考生物圈的开发工作，也已经开始。

今后工作的重点是通过使用实例计算，完善参考处置设施以及运输途径和照射量情景的选择。作为 IAEA 协调研究计划的一部分而正在进行的国别试验计算的结果以及先前两个项目的结果将加以利用。这些资料将作为背景材料，帮助开发用于比较评估的参考生物圈。

作为协调研究计划的一部分正在进行的这些计算，还将提供利用不同的方法计算和比较与放射性物质和非放射性物质组合有关的健康效应的详细实例。

对于有关比较评估计算中要使用的方法的建议而言，这些结果将是关键输入。专家组还在评估用于进行这些计算的方法，并且正在审查从这些和其他项目活动得出的经过选择的建议。 □